

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт  
«Электроэнергетика»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
Г. Н. Чистяков  
подпись инициалы, фамилия  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
код – наименование направления

Анализ компенсации реактивной мощности в контактных сетях участка  
Камышта – Бискалжа Красноярской железной дороги  
тема

Руководитель	_____	<u>доцент каф.ЭЭ, к.т.н.</u>	<u>А.В.Коловский</u>
	подпись, дата	должность, научная степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>Д.В.Степанова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И.А.Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ компенсации реактивной мощности в контактных сетях участка Камышта – Бискамба Красноярской железной дороги» содержит 66 страниц текстового документа, 37 рисунков, 9 таблиц, 27 использованных источников, 3 листа графического материала.

ТЯГОВАЯ СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ, КОНТАКТНАЯ СЕТЬ, ОТСАСЫВАЮЩАЯ ЛИНИЯ, НЕЙТРАЛЬНАЯ ВСТАВКА, ПОСТ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ, ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ, ПОПЕРЕЧНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ.

Объект исследований – контактные сети участка Камышта – Бискамба Красноярской железной дороги.

Предмет исследований – компенсация реактивной мощности в контактных сетях.

Метод исследования – графическое моделирование в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink.

Научная новизна – использование графических методов моделирования в оценке параметров качества электрической энергии.

Цель работы заключается в анализе потерь напряжения и в их компенсации в контактных сетях железной дороги.

Значимость работы обусловлена тем, что теоретические и практические рекомендации проведенного анализа могут быть использованы при реконструкции и модернизации контактных сетей железной дороги.

Область применения – работа может быть предложена как рекомендации к модернизации технического оборудования в контактных сетях.

Задачи выпускной квалификационной работы:

- провести подробный анализ энергетических процессов в контактных сетях, путем графического моделирования в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink.

В течении проработки проекта были получены следующие результаты:

- была составлена графическая модель тягового электроснабжения в системе MATLAB, при подробной проработке каждого элемента в модели.

- выполнен анализ и предложены мероприятия по повышению качества электроэнергии в тяговой сети.

## ABSTRACT

Final qualifying work on «Analysis of the compensation of the reactive power in the contact networks of Kamyshta – Biskamzha section of the Krasnoyarsk railway» contains 66 text documents pages, 37 drawings, 9 tables, 27 sources, 3 sheets graphic materials.

TRACTION NETWORK POWER SUPPLY, SURGERY SUBSTATION, CONTACT NETWORK, SUCTION LINE, NEUTRAL INSERT, POST OF SECTIONING, LONGITUDINAL COMPENSATION, TRANSVERSE PAYMENT.

The object of research – the contact networks supply of Kamyshta – Biskamzha section of the Krasnoyarsk railway.

Research subject – the compensation of the reactive power in the contact networks.

Research methods – graphic modelling in MATLAB system on the data Simulink.

Scientific novelty – using graphic methods of modelling of rating parameters of electricity.

The purpose of work is to analyze voltage drop and compensation in the contact networks on the railway.

The significance of work - due to the fact that the theoretical and practical recommendation of this analysis can be used in reconstruction of the railway.

Scope - work can be offered as recommendations of modernization and development of technical measures in the contact networks.

Tasks of final qualifying work:

- perform the analysis of energetic processes graphical modelling in MATLAB system on the data Simulink.

During the study of the project were as follows:

- there was maid graphical model of traction power supply in the system MATLAB perfectly;
- formed the analysis and propose measures to improve quality of electric energy in traction network.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. Общие особенности электроснабжения железнодорожного транспорта.....	6
1.1 Основные понятия в железнодорожном электроснабжении .....	6
1.2 Особенности работы тяговой сети переменного тока.....	9
1.3 Проблемы электрификации в железнодорожном транспорте .....	11
2 Компенсация реактивной мощности на железной дороге .....	13
2.1 Поперечная компенсация в контактных сетях .....	15
2.2 Продольная компенсация в контактных сетях.....	20
3 Составление реальной математической модели контактных электрических сетей железной дороги в системе MATLAB при помощи пакета Simulink.....	25
3.1 Расчет параметров элементов математической модели тяговой сети электроснабжения .....	26
3.2 Расчет параметров математической модели электроподвижного состава....	32
4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги.....	37
4.1 Исследование режимов работы тяговой сети при прохождении двух ЭПС по обоим путям Нанхчульского тоннеля .....	37
4.2 Исследование режимов работы тяговой сети при прохождении двух ЭПС по обоим путям Нанхчульского тоннеля и одного ЭПС у ТП Югачи.....	43
5 Поиск возможных путей решения.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Однолинейная схема тяговой подстанции Камышта .....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Однолинейная схема тяговой подстанции Югачи .....	59
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Однолинейная схема тяговой подстанции Бискамжа.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Алгоритм расчета параметров линий контактной сети, представленный в М-файле системы MATLAB .....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Алгоритм расчета параметров электровоза ЕРМАК, представленный в М-файле системы MATLAB .....	66

## ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт весьма значим в современном мире. Но качество электроэнергии на железной дороге оставляет желать лучшего. Это объясняется тем, что тяговые потребители обладают рядом особенностей, к которым можно отнести: резкопеременный режим работы, нелинейный характер нагрузки, высокую установочную мощность электроприемника и несимметричность нагрузки.

Одной из основных единиц тяговых электрических сетей является контактная сеть. Она имеет большую протяженность, что, совместно с высокой установочной электрической мощностью тягового состава, приводит к значительным потерям напряжения в сети. В связи с этим, становится актуальной проблема поддержания напряжения на требуемом уровне.

Целью выпускной квалификационной бакалаврской работы является анализ потерь напряжения и их компенсации в контактных сетях железной дороги. Для достижения поставленной цели, была выявлена основная задача, которая выполнена в выпускной работе: подробный анализ энергетических процессов в контактных сетях, исследуемого участка. Для эффективного достижения поставленной задачи, целесообразно будет выполнить моделирование системы тягового электроснабжения в системе MATLAB, при помощи пакета Simulink и его библиотеки элементов SimPowerSystems.

# **1. Общие особенности электроснабжения железнодорожного транспорта**

## **1.1 Основные понятия в железнодорожном электроснабжении**

Электрификация железнодорожного транспорта обладает высокой социальной и экономической значимостью. Без электроснабжения железнодорожный транспорт не сможет функционировать должным образом и регрессирует на свой первоначальный этап развития. Повсеместная электрификация железных дорог начинается с 1895 года, с введения в эксплуатацию электрической тяги железнодорожного состава, тяговых подстанций, контактных сетей, другими словами начинается развитие тяговых сетей электроснабжения.

В России нововведение электротяги началось в 1913 году со строительства линии Петербург – Петергоф. Линию предполагалось запитать на постоянный ток напряжением 1200 В. Были построены две электростанции — в Екатерингофе и Ораниенбауме, но из-за начала Первой мировой войны строительство было остановлено. В 1926 году, уже в СССР, была внедрена первая электротяга в стране, на участке местного значения Баку-Сураханы протяженностью 19 км. Она была запитана постоянным током напряжением 1,2кВ [1].

Тяговая сеть электроснабжения – это сложная электрическая сеть, состоящая из тяговых подстанций, питающих линий, контактных сетей, рельсовых сетей и отсасывающих линий. Сложность тяговой сети объясняется тем, что она содержит контуры, образованные рельсовой сетью, землей и дополнительными проводами. Тогда ток, протекающий от тяговой подстанции к электроподвижному составу (ЭПС), распределяется между проводами контактной сети. Возврат тока на подстанцию осуществляется через рельсовую сеть, землю и далее по отсасывающей линии. Под действием взаимной индуктивной связи, проявляющейся между контурами тяговой сети при

протекании переменного тока, в цепи рельсовая сеть – земля индуцируется ток, направленный противоположно вызвавшему его току в контактной сети.

Тяговая подстанция (ТП) – это электрическая подстанция, предназначенная для питания транспортных средств на электротяге через контактную сеть, так же она является источником питания других потребителей [2].

Контактная сеть (КС) – это комплекс устройств, предназначенный для передачи электроэнергии от тяговых подстанций к ЭПС через токоприемники. Обычно, для электрифицированного транспорта служит фазой тяговой сети (переменный ток) или полюсом (постоянный ток), другой фазой (полюсом) служит рельсовая сеть. Контактная сеть может быть выполнена с контактным рельсом или с контактной подвеской.

Контактная сеть предназначена для работы на открытом воздухе. Поэтому подвержена воздействию климатических факторов: температуре окружающей среды, влажности и давлению воздуха, ветру, дождю, инею и гололеду, солнечной радиации, содержанию в воздухе различных загрязнений. Так же отметим, что сеть подвержена тепловым процессам, возникающим при протекании тягового тока по элементам сети, механическим воздействиям со стороны токоприемников, электрокоррозионным процессам, многочисленным циклическим механическим нагрузкам, износам и др. Все устройства контактной сети должны быть способны противостоять действию перечисленных факторов и обеспечивать высокое качество токосъема в любых условиях эксплуатации. Одной из особенностей использования контактных сетей является то, что эта сеть не имеет резерва, поэтому к ней по надежности предъявляют повышенные требования, с учетом которых осуществляются ее проектирование, строительство и монтаж, техническое обслуживание и ремонт, т.е. контактная сеть относится к 1-й категории потребителей по надежности.

Тяговая рельсовая сеть – это часть тяговой сети железной дороги, представляющая систему рельсов железнодорожного пути, используемых для протекания тяговых токов [3].

Отсасывающая линия тяговой сети — линия электропередачи, соединяющая заземленную фазу или заземленный полюс тяговой подстанции железной дороги, автотрансформаторного пункта, пункта преобразования напряжения с тяговой рельсовой сетью железной дороги.

Рассмотрим принцип работы тяговой сети более подробно, в соответствии с примером рисунка 1.1. Система тягового электроснабжения получает питание от системы внешнего электроснабжения (СВЭ): двух электростанций — тепловой (ТЭС) и атомной (АЭС), районных подстанций (РП) и двух линий электропередачи ЛЭП-110 и ЛЭП-500 кВ. Далее питание поступает на тяговую подстанцию (ТП), которая подает ток для питания электроподвижного состава (ЭПС) по питающим линиям (ПЛ) и контактной сети (КС); ток на подстанцию возвращается по тяговому рельсу и отсасывающей линии (ОЛ). Для разделения двух участков контактной сети служит нейтральная вставка (НВ), напряжение на ней отсутствует и ЭПС проходит ее по инерции [4].

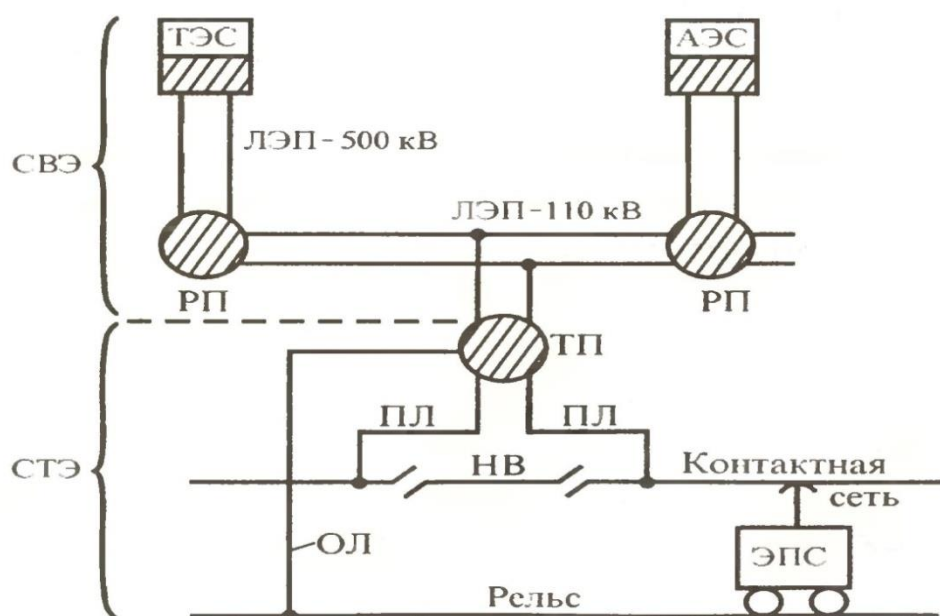


Рисунок 1.1 – Система тягового электроснабжения



Нейтральной вставкой (НВ) является устройство контактной сети, предназначенное для разделения фаз А и Б (секционирования КС) станции и перегона в сетях постоянного 3,3 кВ и переменного 27,5 кВ тока.

## **1.2 Особенности работы тяговой сети переменного тока**

На данный момент в России применяется два вида электрических тяговых сетей: тяговая сеть постоянного тока напряжением 3 кВ и тяговая сеть переменного однофазного тока частотой 50 Гц напряжением 25 кВ. Эти сети различаются в технологическом плане, но при этом выполняют требования надежности и безопасности обслуживания.

Рассмотрим более подробно тяговую сеть переменного однофазного тока частотой 50 Гц напряжением 25кВ (Рисунок 1.2) на примере участка железной дороги Камышта – Югачи.

Как видно из рисунка 1.2, этот участок является линией с двухсторонним питанием. Обе ТП питаются от ЛЭП 220кВ. Трехобмоточные трансформаторы понижают напряжение для двух видов потребителей: тяговых потребителей и нетяговых потребителей (НТ). Отметим, что тяговым потребителем является непосредственно ЭПС, питающийся от пониженного до 27,5кВ напряжения (шины А, В, С). Нетяговые потребители, в нашем случае, питаются от пониженного напряжения, равного 35кВ.

Для того чтобы загрузка фаз внешнего электроснабжения была равномерной, в тяговую сеть напряжение от ТП передается от разных фаз трансформатора. Через выключатель Q1 контактная сеть, предназначенная для перегона слева от ТП1, питается от фазы В. Отметим, что тяговый рельс на подстанции заземляется подключением к фазе С. Через выключатель Q2 контактная сеть также питается от шин фазы В ТП1. Перегон, ведущий к ТП2, запитывается через выключатель Q3 фазы А.

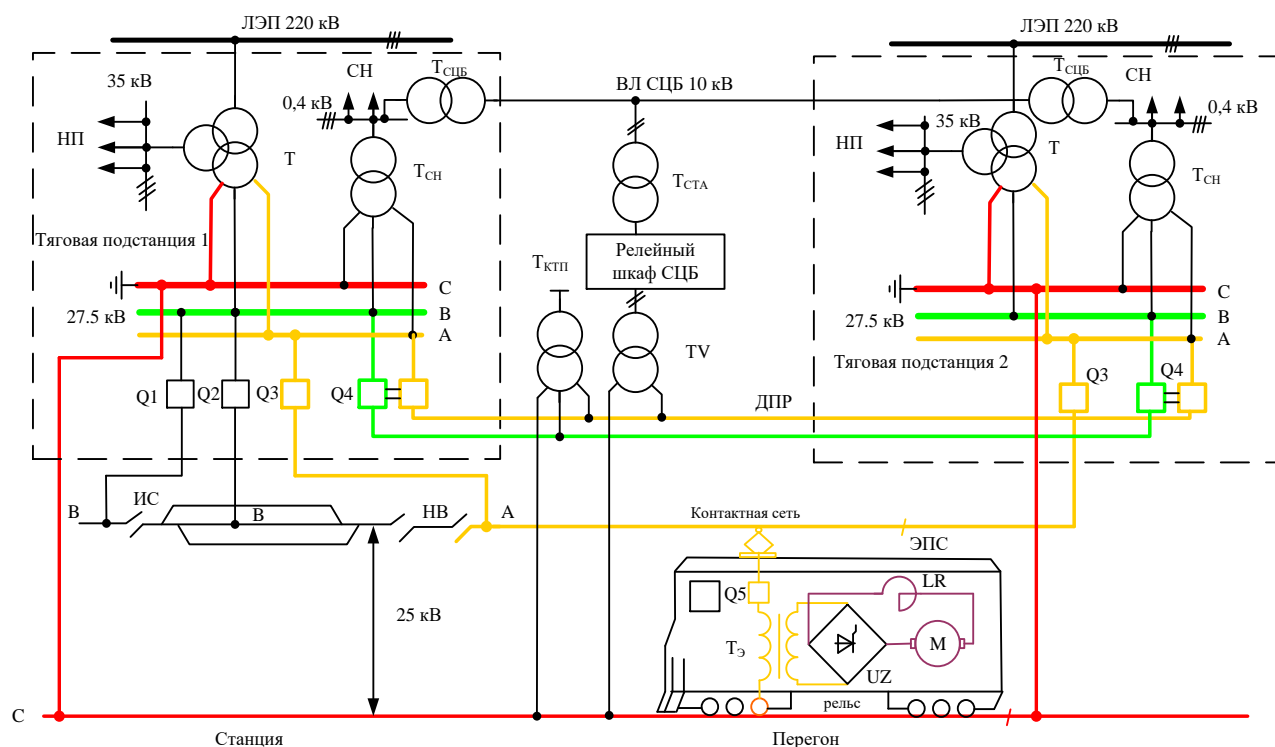


Рисунок 1.2 – Система тягового электроснабжения на переменном однофазном токе частотой 50 Гц напряжением 25кВ

Для разграничения фаз А и В на участке контактной сети, используют нейтральные вставки и изолирующие сопряжения. Нейтральная вставка отделяет фазу В и фазу А в начале перегона от ТП1 к ТП2. Изолирующее сопряжение устанавливается после перегона, ведущего к ТП1. Назначением ИС является переход токоприемников ЭПС с фазы В ТП1 на фазу А перегона, ведущего к ТП2. При этом изолирующие сопряжения нейтральной вставки перекрываются токоприемником поочередно.

К шинам 27,5кВ подключается трансформатор собственных нужд  $T_{CH}$  ТП1. От шин среднего напряжения, через трансформатор  $T_{СЦБ}$ , напряжением 10кВ, передается в высоковольтную линию сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

Нетяговые потребители, так же как и тяговые потребители, запитываются от шин 27,5кВ, через систему ДПР (два провода – рельс). Питание осуществляется по двум проводам фаз А и Б, через выключатель Q4, третьим проводом является рельс. Трансформаторы  $T_{КТП}$  понижают напряжение в

системе ДПР до величины, необходимой потребителю. Резерв питания СЦБ осуществляется через трансформаторы TV, подключенные к одному из проводов линии ДПР и рельсу.

### **1.3 Проблемы электрификации в железнодорожном транспорте**

Система тягового электроснабжения на переменном токе имеет некоторые недостатки. К одним из них относится электромагнитное влияние тяговой сети на линии связи, проходящие вдоль железных дорог, что приводит к необходимости их выполнения в виде кабельных линий, а не воздушных, как на постоянном токе. Таким образом происходит возрастание стоимости электрификации железных дорог.

Еще одной проблемой в контактных сетях является несимметричность токовой нагрузки, а также напряжения. Это объясняется тем, что электровозы являются потребителями однофазного тока, а линии электропередачи работают на трехфазном токе. Данная проблема существует как в тяговой системе, так и во внешней системе электроснабжения.

Следующей проблемой является необходимость монтажа НВ у каждой подстанции. Это связано с тем, что перегоны, прилегающие к станциям, где находится ТП, запитаны от разных фаз внешнего электроснабжения. Существует возможность возгорания контактных проводов, из-за появления электрической дуги, которая тянется за токоприемником. Это обуславливается тем, что ток прекращает протекать через двигатели ЭПС не сразу при переходе токоприемника на нейтральную вставку. В этом случае, машинист обязан отключить ток на подъезде к НВ. Но преждевременное отключение тока может вызвать остановку ЭПС.

Еще одним недостатком системы переменного тока является сложность конструкции и удорожание электровозов. Это объясняется тем, что на них требуется установка тяговых трансформаторов  $T_g$  и выпрямителей UD.

Отметим, что основными параметрами системы тягового электроснабжения железных дорог являются: мощность тяговых подстанций, расстояние между ними и площадь сечения проводов контактной сети.

Вследствие того, что протяженность сетей весьма велика, возникают изменения значения напряжения. При изменении напряжения будет меняться потребляемая реактивная мощность сети (Рисунок 1.3). Стоит помнить, что при уменьшении напряжения примерно до 85 % от номинального значения реактивная мощность уменьшается, вследствие уменьшения намагничивающей мощности асинхронных двигателей и трансформаторов сети. При дальнейшем снижении напряжения двигатели ЭПС (основных потребителей сети) начнут затормаживаться, из-за уменьшения их вращающегося момента. Потребление реактивной мощности двигателями увеличивается. В результате увеличения потребления реактивной мощности увеличиваются потери напряжения в сети, что приводит к дальнейшему уменьшению напряжения на нагрузке. Процесс уменьшения напряжения приобретает лавинообразный характер, другими словами происходит процесс лавины напряжения. При такой ситуации возникает опасность опрокидывания (остановка) двигателей [5].

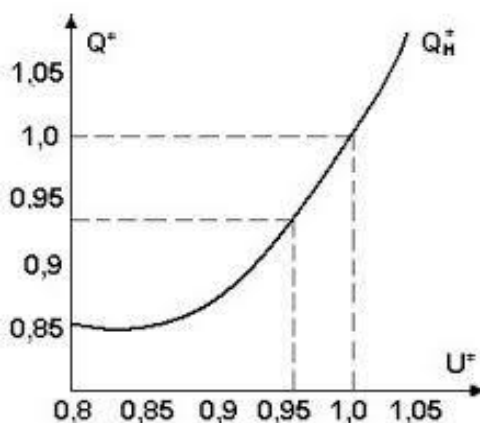


Рисунок 1.3 – Обобщенная статистическая характеристика реактивной мощности нагрузки по напряжению

Вследствие решения данных проблем, очевидно, что в тяговой сети необходимо использование компенсации реактивной мощности.

## **2 Компенсация реактивной мощности на железной дороге**

Известно, что компенсация реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока обеспечивает повышение энергетической эффективности работы системы тягового электроснабжения, что позволяет повысить пропускную и провозную способность участка железной дороги [6].

Основными задачами, решаемыми при компенсации реактивной мощности являются:

1. Снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и в оборудовании тяговых подстанций;
2. Снижение уровня потребления реактивной мощности тяговыми подстанциями в режимах тяги и рекуперативного торможения;
3. Снижение потерь напряжения в тяговой сети и повышение пропускной и провозной способности участка железной дороги;
4. Снижение уровня несинусоидальности напряжения в тяговой сети.

Решением этих задач является установка устройств поперечной и продольной компенсации реактивной мощности, а так же применяется установка фильтрокомпенсирующих устройств, с целью снижения уровня высших гармоник, т.е. несинусоидальности напряжения.

Основными местами установки компенсирующего оборудования реактивной мощности в тяговой сети являются шины 27,5 кВ тяговых подстанций (Рисунок 2.1) и постов секционирования (Рисунок 2.2) контактной сети.

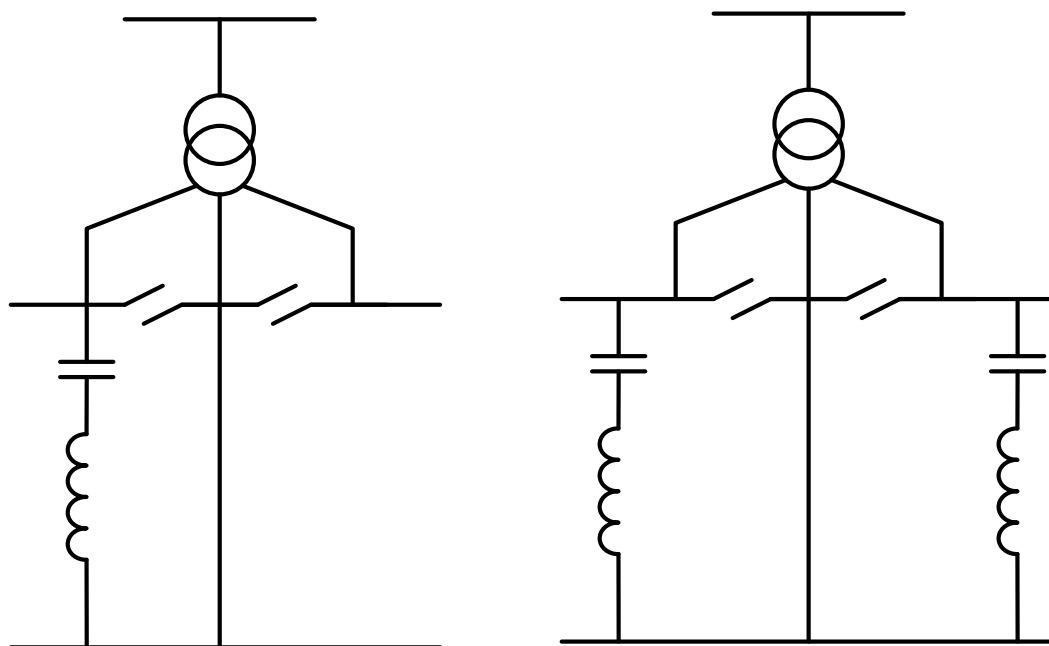


Рисунок 2.1 – Схема включения компенсирующих устройств на шины тяговых подстанций

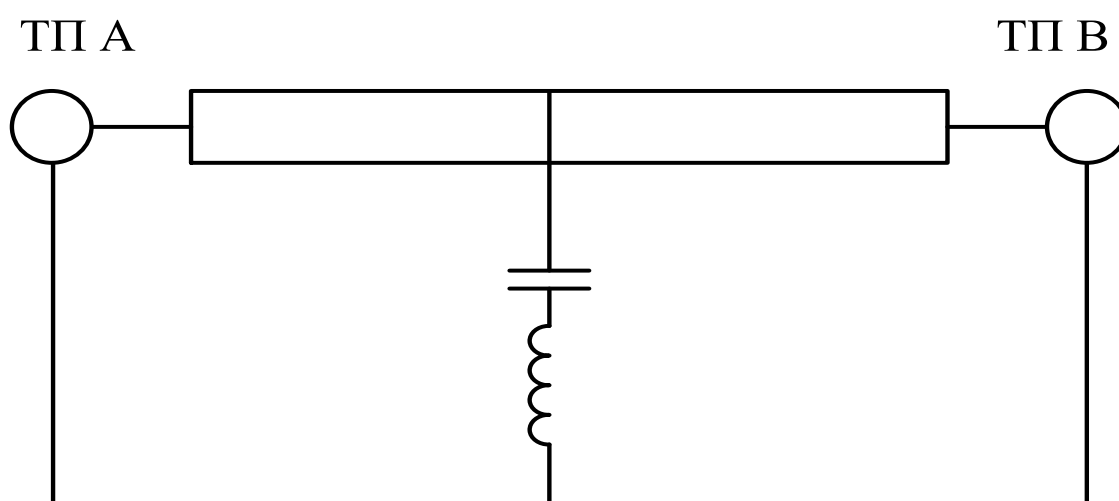


Рисунок 2.2 – Схема включения компенсирующих устройств на пост секционирования

Особенностью установки компенсирующих устройств (КУ) в системе тягового электроснабжения является их однофазное или двухфазное исполнение, а так же наличие защитного реактора для ограничения резонансных явлений на высоких частотах.

Обратим внимание на то, что устройство поперечной компенсации реактивной мощности – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое параллельно нагрузке.

А устройство продольной компенсации реактивной мощности – устройство компенсации реактивной мощности, включаемое последовательно с нагрузкой.

Фильтрокомпенсирующим устройством называется устройство компенсации реактивной мощности, обладающее дополнительной функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока железнодорожного электроподвижного состава.

## **2.1 Поперечная компенсация в контактных сетях**

Реактивная мощность в установках переменного тока нагружает обмотки электрических механизмов контактной сети. К таким механизмам относятся, трансформаторы и провода линий. В результате происходит увеличение потерь электроэнергии и уменьшение располагаемой мощности соответствующих устройств. Реактивный ток, вызывает дополнительные потери напряжения на зажимах потребителя, из-за протекания по элементам тяговой сети электроснабжения, которые обладают реактивным сопротивлением [7].

Поэтому на шинах тяговых подстанциях устанавливаются поперечные компенсирующие устройства. Обычно на тяговых подстанциях переменного тока поперечными компенсирующими устройствами (ППК) являются конденсаторные батареи. При этом сопротивления ППК не должны отличаться друг от друга не более, чем на 3% [8].

Рассмотрим более подробно принципиальную схему работы ППК в однофазной сети. Учтем, что контактные сети железных дорог в основном имеют индуктивную нагрузку, в этом случае участку тяговой сети с ППК будет соответствовать рисунок 2.3.

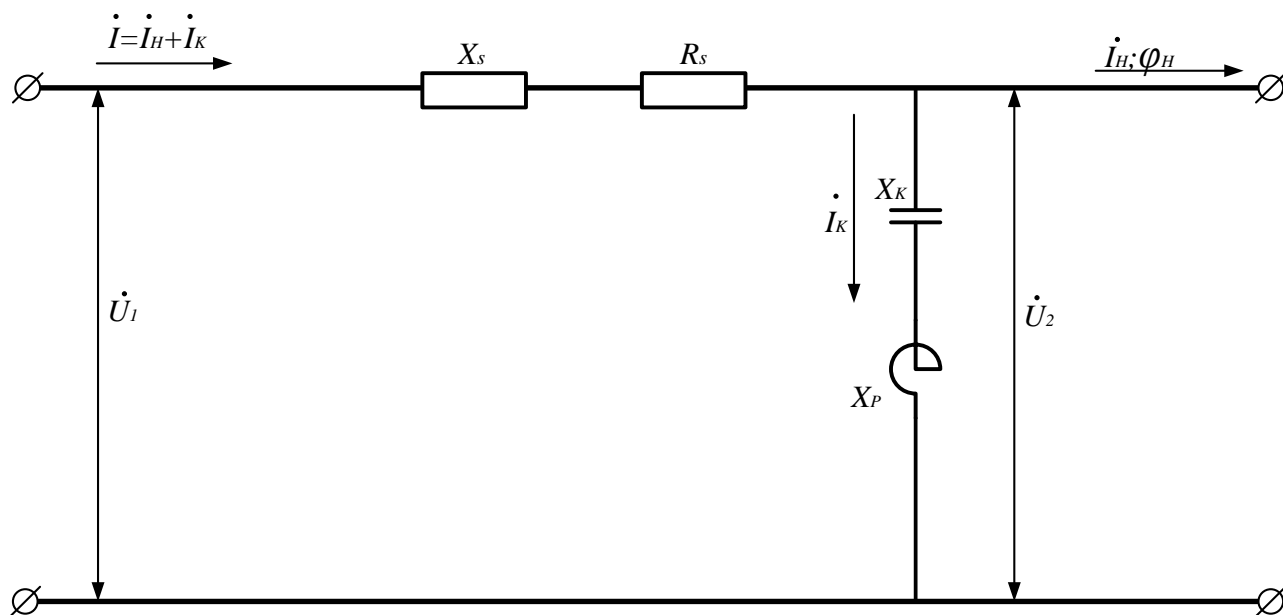


Рисунок 2.3 – Схема замещения участка тяговой сети при ППК

Данной схеме замещения соответствует векторная диаграмма, изображенная на рисунке 2.4.

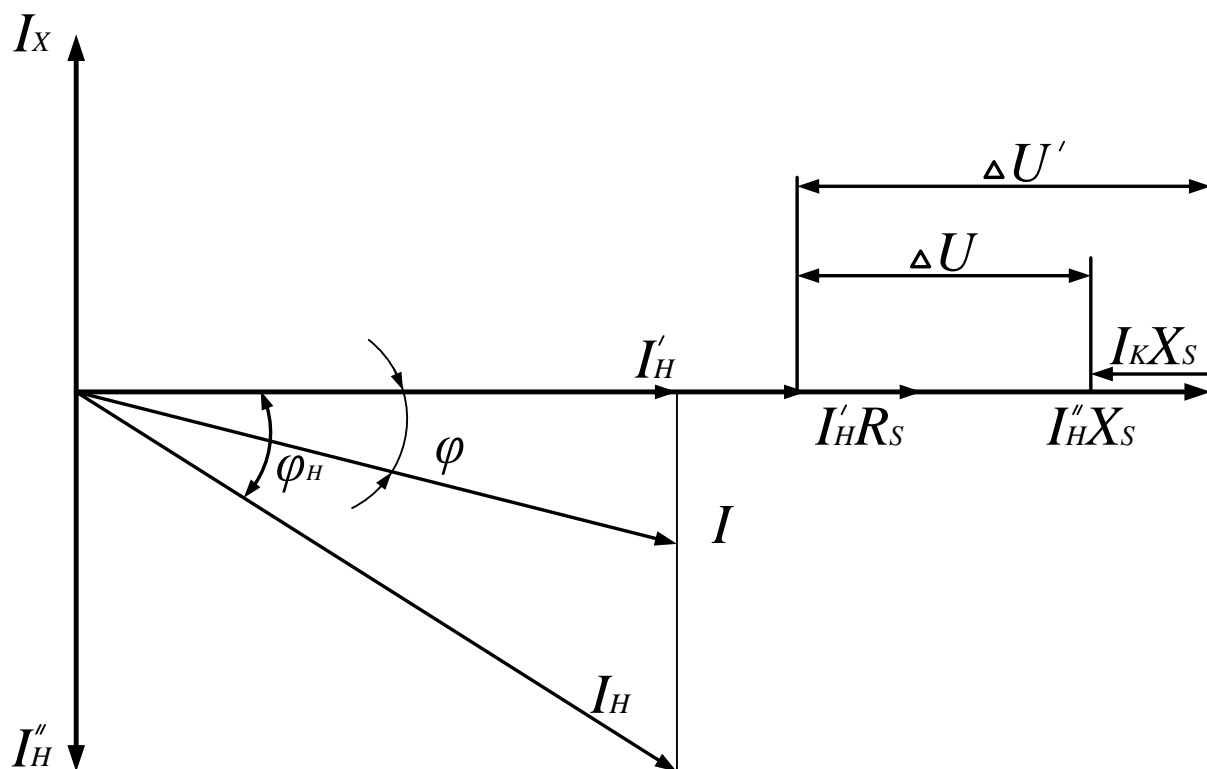


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма участка тяговой сети при ППК



На рисунках 2.3 и 2.4 используются следующие обозначения:

$R_S$  – активное сопротивление системы (от источника питания до места установки ППК);

$X_S$  – индуктивное сопротивление системы (от источника питания до места установки ППК);

$X_K$  – емкостное сопротивление ППК;

$X_P$  – индуктивное сопротивление реактора;

$\varphi_H$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в начале линии без ППК;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в начале линии с ППК;

$U_1$  – напряжение в начале (у источника питания) линии;

$U_2$  – напряжение в конце (в месте установки ППК) линии;

$I_H$  – ток нагрузки;

$I'_H$  – активная составляющая тока нагрузки;

$I''_H$  – реактивная составляющая тока нагрузки;

$I_K$  – ток на зажимах устройства ППК;

$I$  – суммарный ток нагрузки и ППК

Из векторной диаграммы (Рисунок 2.4) можно увидеть, что включение конденсаторной установки уменьшает угол сдвига между напряжением и током в начале линии, что в конечном итоге улучшает коэффициент мощности ЭПС. При этом происходит уменьшение потерь напряжения в системе, согласно формуле 2.1.

$$\Delta U = I'_H R_S + I''_H X_S - I_K X_S \quad (2.1)$$

Из векторной диаграммы и выражения (2.1) можно сделать вывод, что при чательном подборе емкостного сопротивления устройства ППК, и как следствие, подборе тока на зажимах устройства ППК, можно потери напряжения свести к нулю или даже к отрицательному значению. В последнем

случае напряжение у потребителя станет выше, чем напряжение на зажимах источника энергии. Включение конденсаторной установки ППК на шинах тяговых подстанций 27,5 кВ создаст условия для возникновения резонанса напряжений. Тогда колебательный контур будет иметь две параллельных ветви: первая ветвь будет состоять из индуктивных сопротивлений системы и трансформаторов ТП, а вторая ветвь образуется из индуктивных сопротивлений тяговой сети и ЭПС.

В момент окончания коммутации вентилей ЭПС, происходит скачкообразное увеличение напряжения (оно происходит дважды за период). В колебательном контуре возникает ток собственных колебаний. Этот ток имеет повышенную частоту и стремится к значению, соизмеряемому с основным током. Возникает резонанс напряжений, согласно условию (2.2).

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (2.2)$$

где  $\omega_0$  – угловая резонансная частота колебательного контура;

$L$  – индуктивное сопротивление колебательного контура;

$C$  – емкостное сопротивление колебательного контура.

Угловая резонансная частота колебательного контура определяется по выражению (2.3).

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (2.3)$$

где  $f_0$  – частота резонанса колебательного контура

В контактных сетях резонанс напряжений возникает при каждой нечетной высшей гармонике. Для того чтобы нарушить условие (2.2), последовательно устройству ППК устанавливается реактор. Сопротивление реактора должно соответствовать условию (2.4).

$$X_p = 0,125X_K, \quad (2.4)$$

При этом напряжение на устройстве ППК, относительно напряжения на конце линии будет соответствовать выражению (2.5),

$$U_K = 1,125U_2, \quad (2.5)$$

т.е. оно повысится на 12,5%. Что составит 31 кВ на зажимах устройства ППК, при напряжении на шинах ТП 27,5кВ. Ток останется неизменным. Следовательно, мощность ППК так же увеличится 12,5%, но из-за наличия 3-й высшей гармоники мощность увеличится на 20%.

На ТП устройства ППК устанавливаются во вторичной цепи обмоток трансформатора. Так же устройства ППК устанавливаются на постах секционирования. При этом могут быть дополнительно уменьшены потери энергии в тяговой сети, а также повышено напряжение в ней. При малой нагрузке в фидерной зоне, напряжение может выйти за допусковые пределы. Так же учитывается, что мощность ППК растет с увеличением напряжения. В случае большой нагрузки происходит большое понижение напряжения в сети и эффект от ППК будет сильно убывать. В этих условиях целесообразно применять регулирующую установку ППК.

При установке ППК, должны выполняться следующие условия [6]:

1. Выбор фазы включения устройства поперечной компенсации реактивной мощности на шинах тяговой подстанции определяется необходимостью симметрирования тяговой нагрузки. Рекомендуется включать устройства поперечной компенсации реактивной мощности в отстающую фазу тяговой подстанции.

2. В случае, если нагрузка опережающей фазы значительно превосходит нагрузку отстающей фазы, необходимо рассмотреть вариант установки устройства поперечной компенсации реактивной мощности как в отстающую, так и опережающую фазы.

3. На участках железных дорог со значительными колебаниями тяговой нагрузки рекомендуется применять регулируемые устройства поперечной

компенсации реактивной мощности, которые позволяют изменять потребляемую реактивную мощность ступенчато (одно- или многозвенные устройства) или плавно (статические тиристорные компенсаторы).

4. При необходимости снижения уровня высших гармоник (несинусоидальности) напряжения в тяговой сети в качестве устройств поперечной компенсации применяют фильтрокомпенсирующие устройства, располагаемые на посту секционирования или на тяговой подстанции.

Нужно помнить, что повышение напряжения в тяговой сети при установке устройства компенсации реактивной мощности не должно превышать максимально допустимого значения (29 кВ). А в случае, если после выбора мощности устройства поперечной компенсации реактивной мощности на тяговой подстанции и выполнения проверки по обеспечению поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, возникает необходимость повышения минимального уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, то на тяговых подстанциях дополнительно размещают устройства поперечной компенсации реактивной мощности.

## **2.2 Продольная компенсация в контактных сетях**

Из-за постоянных изменений напряжения на ЭПС, т.е. из-за потерь в тяговой системе электроснабжения КС, требуется уменьшение индуктивной составляющей сопротивления системы. Данное уменьшение можно достигнуть путем последовательного включения конденсаторной установки, т.е. осуществить продольную компенсацию (ПДК).

На рисунке 2.5 изображена схема включения ПДК в контактную сеть вместе с эпюром напряжения на участке. Из эпюра можно увидеть, что в месте установки ПДК происходит скачок напряжения, т.е. в точке установки ПДК напряжение возрастает на некую величину, отличную от значения перед устройством.



На рисунках 2.5 и 2.6 используются следующие обозначения:

ИП – источник питания;

ЭПС – электроподвижной состав;

$R_S$  – активное сопротивление системы (от источника питания до места установки ПДК);

$X_S$  – индуктивное сопротивление системы (от источника питания до места установки ПДК);

$X_K$  – емкостное сопротивление ПДК;

$\varphi_1$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в начале линии с ПДК;

$\varphi_2$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в конце линии перед ПДК;

$\varphi_H$  – угол сдвига фаз между напряжением и током в конце линии после ПДК;

$U_1$  – напряжение в начале (у источника питания) линии;

$U_2$  – напряжение в конце линии перед местом установки ПДК;

$U_H$  – напряжение в конце линии после места установки ПДК;

$I_H$  – ток нагрузки.

Из векторной диаграммы (Рисунок 2.6) можно увидеть, падение напряжения в установке ПДК отстает от тока нагрузки на  $90^\circ$ , из-за своего емкостного характера. Создается угол сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi_H$ , который позволяет уменьшить потери напряжения до нуля или до отрицательного значения в соответствии с формулами (2.6) и (2.7), за счет емкостного сопротивления  $X_K$  ПДК.

$$\Delta U = I_H Z_C \quad (2.6)$$

$$Z_C = R_S \cos \varphi_H + (X_S - X_K) \sin \varphi_H \quad (2.7)$$

где  $Z_C$  – составное сопротивление системы тяговой сети.

Основной задачей ПДК является уменьшение реактивного сопротивления системы, что улучшает коэффициент мощности самой системы.

Устройство продольной компенсации можно устанавливать в любой точке контактной сети (Рисунок 2.7). Но при этом нужно учитывать, что нельзя устанавливать устройство с «запасом» мощности, т.к. это может все устройства тяговой сети из строя.

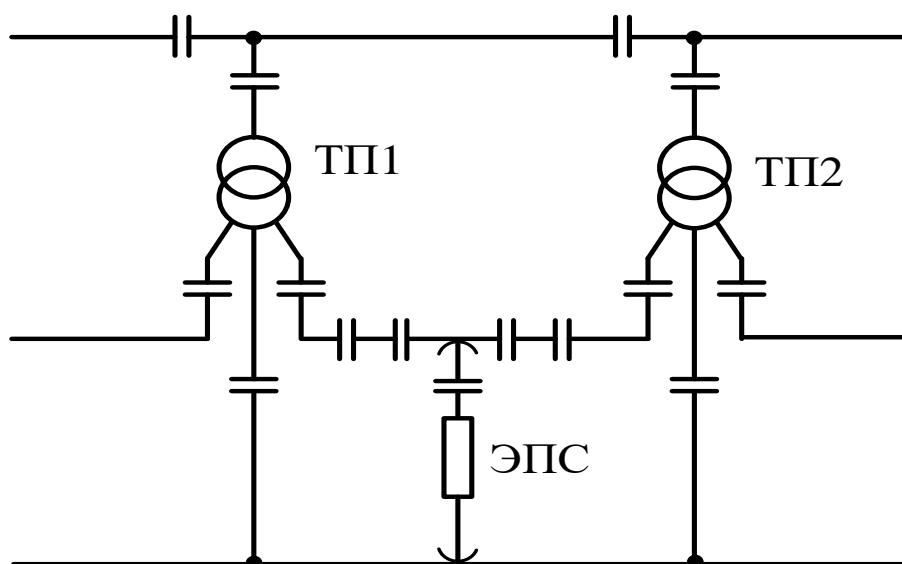


Рисунок 2.7 – Места установки ПДК

Устройство ПДК обладает некоторыми свойствами, такими как автоматичность и безынерционность действия по реактивным составляющим потерь напряжения. Данные свойства очень выгодны в условиях эксплуатации тяговой сети, т.к. нагрузка на ней имеет резкий и непостоянный характер.

Устройство ПДК имеет отрицательный характер влияния на кривую напряжения – возникает несинусоидальность токов, которая вызывает потери напряжения, соответствующие каждой частоте гармоник.

Емкостное сопротивление обратнопропорционально частотам гармоник, т.е. чем выше гармоника по порядку, тем ниже сопротивление емкостной установки (в конденсаторе). Изменение емкостного сопротивления прямопропорционально изменению напряжения, вызванное гармониками тока. Т.е. чем ниже сопротивление устройства ПДК, тем меньше потери напряжения в контактной сети.

Включение устройств ПДК в тяговую сеть приводит к уменьшению реактивного сопротивления системы для любой гармоники токовой нагрузки и следовательно для любой гармоники по напряжению. Чем меньше уменьшение, тем выше гармоника по частоте.

При установке устройств ПДК должны выполняться следующие условия, связанные с устройством понижающего трансформатора на ТП [6]:

**Условие №1:** Установка непереключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности целесообразна, если на расчетном участке железной дороги на тяговую нагрузку постоянно работает только один понижающий трансформатор;

**Условие №2:** Установка переключаемого устройства продольной компенсации реактивной мощности с двухступенчатым регулированием целесообразна, если на тяговую нагрузку постоянно работают два понижающих трансформатора или же второй понижающий трансформатор работает только при кратковременном увеличении тяговой нагрузки. В этом случае постоянно в работу введена первая ступень, а вторую подключают при включении в работу второго понижающего трансформатора.



### 3 Составление реальной математической модели контактных электрических сетей железной дороги в системе MATLAB при помощи пакета Simulink

При помощи библиотеки SimPowerSystems была симитирована работа тяговой сети электроснабжения железной дороги. За основу был взят участок контактной сети: Камышта – Бискамжа Красноярской железной дороги. Причиной выбора данного участка является следующее: железнодорожному составу, проходя данный участок, приходится работать как в нормальном, так и в рекуперативном режиме. Причиной такой смены режимов работы электроподвижного состава является горный рельеф местности, поэтому составу приходится двигаться как в гору, так и с горы (Рисунок 3.1).

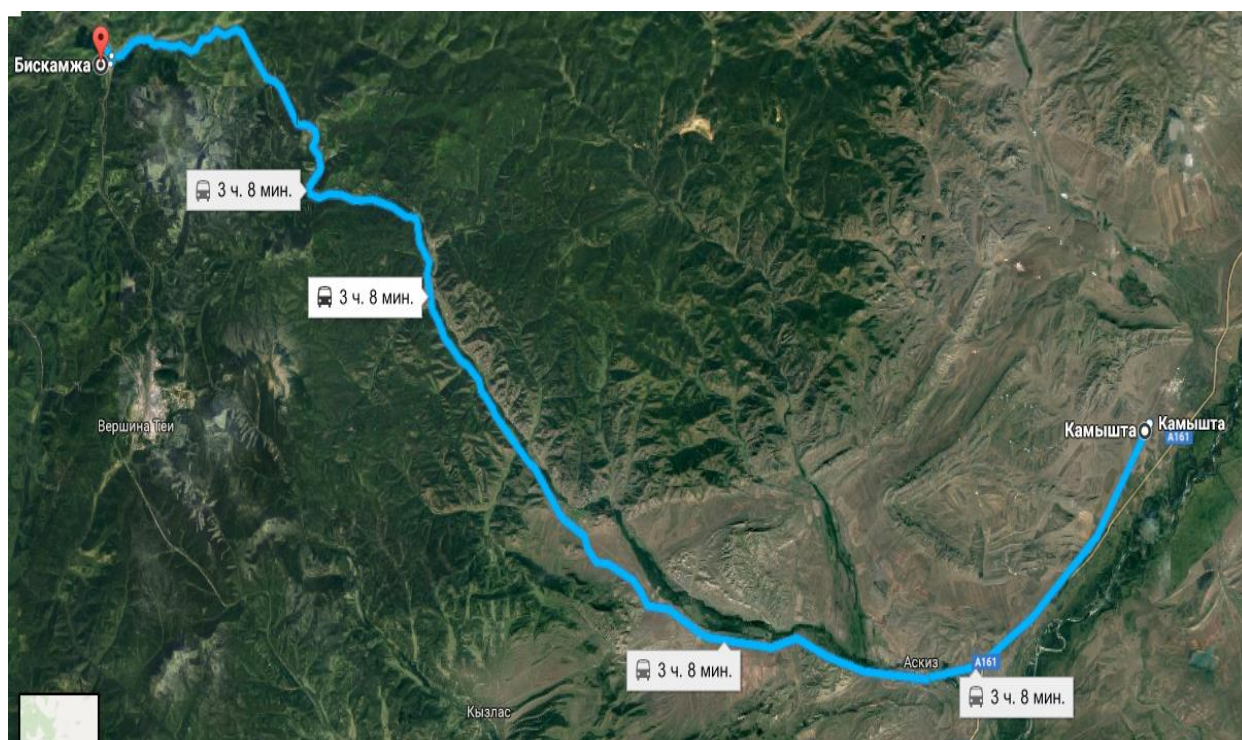


Рисунок 3.1 – Проектируемый участок Красноярской железной дороги  
Камышта – Бискамжа

На выбранном участке контактной сети, целесообразно исследовать показатели качества электроэнергии, при различных режимах работы и местах прохождения ЭПС. Модель данного участка позволит определить необходимый

тип компенсации реактивной мощности на железной дороге. Моделирование различных режимов работы ЭПС на одном и том же участке позволит более подробно рассмотреть поставленную задачу выбора типа компенсирующих устройств на железной дороге (ЖД).

Основными элементами модели графического моделирования тяговой сети являлись: тяговая подстанция, контактная сеть, электровоз в нормальном режиме, электровоз в рекуперативном режиме, система ДПР (два повода – рельс) и компенсирующие устройства.

Все элементы модели были составлены при помощи библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink системы MATLAB.

### 3.1 Расчет параметров элементов математической модели тяговой сети электроснабжения

Для моделирования тяговой системы электроснабжения, произведен расчет параметров элементов математической модели. Схематичное представление модели тяговой сети представлено на рисунке 3.2. Исследуемый участок условно можно разделить на два участка: Камышта – Югачи и Югачи – Бискамжа. Поэтому на рисунке 3.2 изображена схема с двухсторонним питанием [9].

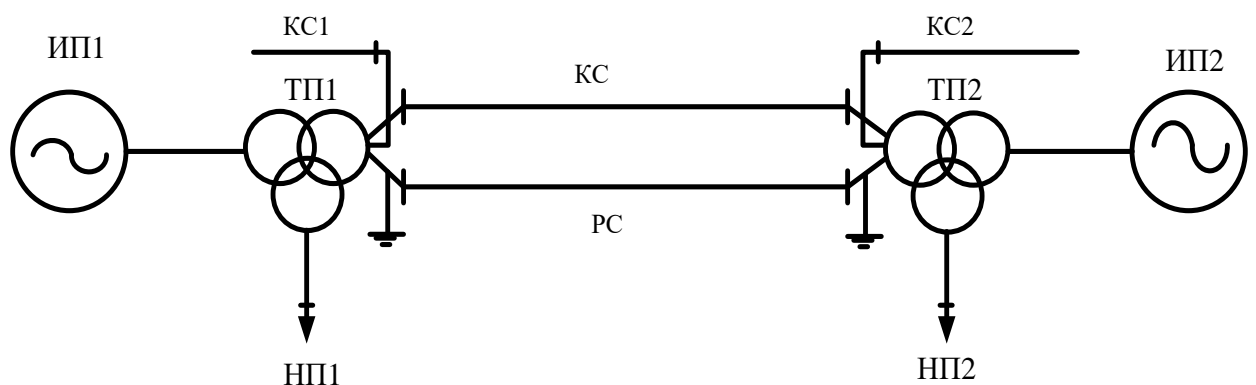


Рисунок 3.2 – Структурная схема тяговой сети

На рисунке 3.2 используются следующие обозначения:

ИП – источник питания;

ТП – тяговая подстанция;

НП – нетяговый потребитель;

КС – контактная сеть;

РС – рельсовая сеть.

На исследуемом участке находятся три тяговых подстанции:

1. Тяговая подстанция Камышта;

2. Тяговая подстанция Югачи;

3. Тяговая подстанция Бискамжа.

Однолинейные схемы тяговых подстанций изображены в приложениях А–В.

Для моделирования произведем расчет силовых трансформаторов подстанций. Номинальные данные трансформаторов подстанций представлены в таблице 3.1 [10]. Расчет для каждого силового трансформатора производится по формулам (3.1 – 3.9) [11].

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ВН}}} \cdot 10^3, (\text{А}) \quad (3.1)$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток трансформатора (А);  
 $S_{\text{ном}}$  — полная мощность трансформатора (МВт);  
 $U_{\text{ВН}}$  — напряжение обмотки высокого напряжения (кВ).

$$U_{\text{кз}i} = \frac{U_{i\text{Н}} \cdot u_{\text{кз}i}}{100}, (\text{кВ}) \quad (3.2)$$

где  $U_{\text{кз}i}$  — напряжение КЗ  $i$ -й обмотки трансформатора (кВ);  
 $u_{\text{кз}i}$  — напряжение КЗ  $i$ -й обмотки трансформатора (%);  
 $U_{i\text{Н}}$  — напряжение обмотки  $i$ -го напряжения (кВ).

$$I_{xx} = \frac{I_{ном} \cdot I_{xx\%}}{100}, (A) \quad (3.3)$$

где  $I_{ном}$  — номинальный ток трансформатора (А);  
 $I_{xx}$  — ток холостого хода трансформатора (А);  
 $I_{xx\%}$  — ток холостого хода трансформатора (%).

$$\varphi_{kzi} = \arccos \frac{P_{kз}}{U_{kzi} I_{ном}}, (^\circ) \quad (3.4)$$

где  $\varphi_{kzi}$  — угол между напряжением и током в режиме КЗ  $i$ -й обмотки ( $^\circ$ );  
 $P_{kз}$  — мощность короткого замыкания (кВт);  
 $U_{kzi}$  — напряжение КЗ  $i$ -й обмотки трансформатора (кВ);  
 $I_{ном}$  — номинальный ток трансформатора (А).

$$\varphi_{xx} = \arccos \frac{P_{xx}}{U_{BH} I_{xx}}, (^\circ) \quad (3.5)$$

где  $\varphi_{xx}$  — угол между напряжением и током в режиме ХХ ( $^\circ$ );  
 $P_{xx}$  — мощность холостого хода (кВт);  
 $U_{BH}$  — напряжение обмотки высокого напряжения (кВ);  
 $I_{xx}$  — ток холостого хода трансформатора (А).

$$R_m = \frac{S_{ном}}{U_{BH} I_{xx} \cos \varphi_{xx}} \cdot 10^3, (o.e) \quad (3.6)$$

где  $R_m$  — активное магнитное сопротивление трансформатора (о.е.);  
 $U_{BH}$  — напряжение обмотки высокого напряжения (кВ);  
 $I_{xx}$  — ток холостого хода трансформатора (А);  
 $\cos \varphi_{xx}$  — коэффициент активной мощности хх;  
 $S_{ном}$  — полная мощность трансформатора (МВт).

$$L_m = \frac{S_{ном}}{U_{BH} I_{xx} \sin \varphi_{xx}} \cdot 10^3, (o.e) \quad (3.7)$$

где  $L_m$  — индуктивное магнитное сопротивление трансформатора (о.е.);  
 $U_{BH}$  — напряжение обмотки высокого напряжения (кВ);  
 $I_{xx}$  — ток холостого хода трансформатора (А);  
 $\cos \varphi_{xx}$  — коэффициент активной мощности хх;  
 $S_{ном}$  — полная мощность трансформатора (МВт).

$$R_1 = R'_2 = R'_3 = \frac{S_{\text{ном}} U_{\text{кз}} \cos \varphi_{\text{кз}}}{2 U_{\text{ВН}}^2 I_{\text{ном}}} \cdot 10^3, (\text{о.е}) \quad (3.8)$$

где  $R_1$  — активное сопротивление обмотки трансформатора (о.е.);  
 $S_{\text{ном}}$  — полная мощность трансформатора (МВт);  
 $U_{\text{ВН}}$  — напряжение обмотки высокого напряжения (кВ);  
 $U_{\text{кз}}$  — напряжение короткого замыкания трансформатора (кВ);  
 $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток трансформатора (А);  
 $\cos \varphi_{\text{кз}}$  — коэффициент активной мощности кз.

$$L_{pi} = \frac{S_{\text{ном}} U_{\text{кз}i} \sin \varphi_{\text{кз}i}}{2 U_{iH}^2 I_{\text{ном}}} \cdot 10^3, (\text{о.е}) \quad (3.9)$$

где  $L_{pi}$  — реактивное сопротивление  $i$ -й обмотки трансформатора (о.е.);  
 $S_{\text{ном}}$  — полная мощность трансформатора (МВт);  
 $U_{iH}$  — напряжение обмотки  $i$ -ого напряжения (кВ);  
 $U_{\text{кз}}$  — напряжение КЗ  $i$ -й обмотки трансформатора (кВ);  
 $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток трансформатора (А).  
 $\sin \varphi_{\text{кз}}$  — коэффициент реактивной мощности кз.

Таблица 3.1 — Характеристики силовых трансформаторов тяговых подстанций

ПС	Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВА	$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ			$u_{\text{кз}}$ , %			$\Delta P_{\text{кз}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{хх}}$ , кВт	$I_{\text{хх}}$ , %
			ВН	СН	НН	ВН	СН	НН			
Камышта	ТДТНЖ – 40000/220/35/27,5	40	230	38,5	27,5	12,5	9,5	0	220	54	0,55
Югачи	ТДТНЖ – 40000/220/35/27,5	40	230	38,5	27,5	12,5	9,5	0	220	54	0,55
Бискамжа	ТДТНЖ – 40000/220/35/27,5	40	230	38,5	27,5	12,5	9,5	0	220	54	0,55

Так как напряжение короткого замыкания на обмотке низкого напряжения равна 0, потери холостого хода и потери короткого замыкания равны для всех обмоток, то активные приведенные сопротивления обмоток НН и СН трансформатора будут равны активному сопротивлению обмотки ВН, а расчет для реактивных обмоток будет индивидуальным.

Для примера произведем расчет для подстанции Камышта, результаты расчета для остальных подстанций представим в таблице 3.2.

### ТП Камышта:

$$I_{\text{ном}} = \frac{40}{230} \cdot 10^3 = 173,9 \text{ (A)};$$

$$U_{\text{кзВН}} = \frac{230 \cdot 12,5}{100} = 28,75 \text{ (кВ)};$$

$$U_{\text{кзСН}} = \frac{38,5 \cdot 9,5}{100} = 3,6575 \text{ (кВ)};$$

$$U_{\text{кзНН}} = \frac{27,5 \cdot 0}{100} = 0 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\text{xx}} = \frac{173,9 \cdot 0,55}{100} = 0,96 \text{ (A)};$$

$$\varphi_{\text{кзВН}} = \arccos \frac{220}{28,75 \cdot 173,9} = 87,5^\circ;$$

$$\varphi_{\text{кзСН}} = \arccos \frac{220}{3,6575 \cdot 173,9} = 69,8^\circ;$$

$$\varphi_{\text{xx}} = \arccos \frac{54}{230 \cdot 0,96} = 75,8^\circ;$$

$$R_m = \frac{40}{230 \cdot 0,96 \cdot \cos 75,8} \cdot 10^3 = 738,5 \text{ (о.е)};$$

$$L_m = \frac{40}{230 \cdot 0,96 \cdot \sin 75,8} \cdot 10^3 = 186,9 \text{ (о.е)};$$

$$R_1 = R'_2 = R'_3 = \frac{40 \cdot 28,75 \cdot \cos 87,5}{2 \cdot 230^2 \cdot 173,9} \cdot 10^3 = 0,0027 \text{ (о.е)};$$

$$L_{p\text{ВН}} = \frac{40 \cdot 28,75 \cdot \sin 87,5}{2 \cdot 230^2 \cdot 173,9} \cdot 10^3 = 0,062 \text{ (о.е)};$$

$$L_{p\text{СН}} = \frac{40 \cdot 3,6575 \cdot \sin 69,8}{2 \cdot 38,5^2 \cdot 173,9} \cdot 10^3 = 0,266 \text{ (о.е)};$$

$$L_{p\text{НН}} = 0 \text{ (о.е)}$$

Расчеты для оставшихся подстанций сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — Расчетные параметры модели трансформаторов тяговых подстанций

ПС	$I_{\text{ном}}, \text{A}$	$U_{\text{кз}}, \text{кВ}$			$I_{\text{xx}}, \text{A}$	$\varphi_{\text{xx}}, ^\circ$	$\varphi_{\text{кз}}, ^\circ$			$R_m, \text{о.е.}$	$L_m, \text{о.е.}$	$R, \text{о.е.}$	$L_p, \text{о.е.}$		
		ВН	СН	НН			ВН	СН	НН				ВН	СН	НН
Камышта	173,9	28,75	3,6575	0	0,96	75,8	87,5	69,8	—	738,5	186,9	0,0027	0,062	0,266	0
Югачи	173,9	28,75	3,6575	0	0,96	75,8	87,5	69,8	—	738,5	186,9	0,0027	0,062	0,266	0
Бискамжа	173,9	27,75	3,6575	0	0,96	75,8	87,5	69,8	—	738,5	186,9	0,0027	0,62	0,266	0

Для расчета параметров линий был написан алгоритм расчета в М-файле системы MATLAB (Приложение Г) [12] и [13]. Номинальные данные элементов линий контактной сети представлены в таблице 3.3 [14] и [15].

Таблица 3.3 — Номинальные данные элементов линий контактной сети

Наименование элемента КС	Марка провода/рельса	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км
Контактный провод	МФ100	0,185	0,441
Несущий трос	М-120	0,158	0,435
Несущий трос	ПБСМ-95	0,704	0,435
Усиливающий провод	А-185	0,17	0,355
Воздушная линия	АС-185	0,17	0,377
Рельс	Р65	0,055	0,138

По результатам расчетов была собрана математическая модель контактной сети участка железной дороги. Модель была собрана в графическом редакторе, при помощи библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink системы MATLAB. Графическая модель контактной сети представлена на рисунке 3.3.

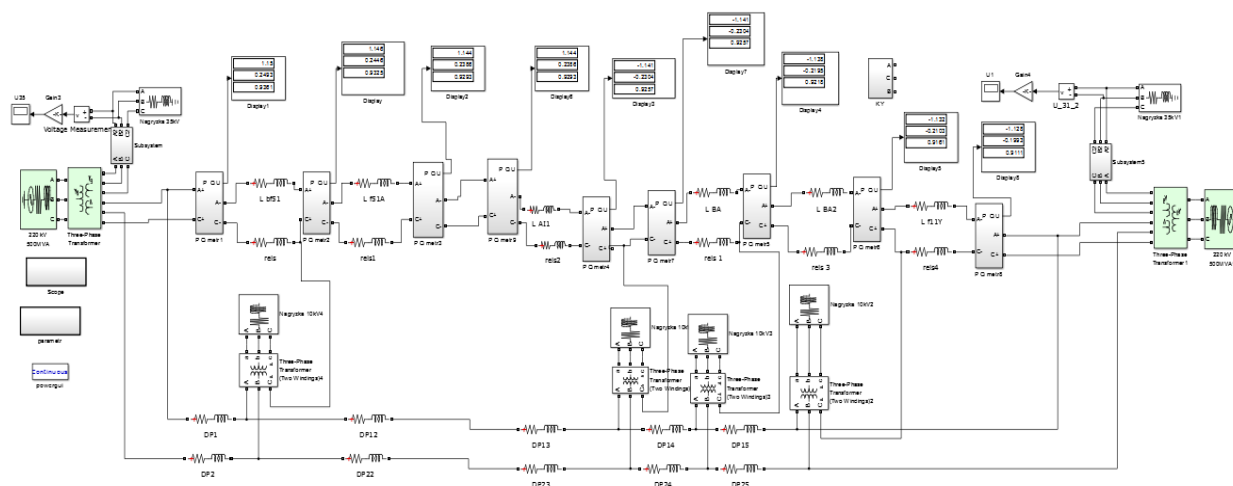


Рисунок 3.3 – Модель контактной сети тягового электроснабжения



## 3.2 Расчет параметров математической модели электроподвижного состава

Основными элементами нагрузки контактных сетей тягового электроснабжения являются электроподвижные составы. На исследуемом участке, Камышта – Бискамжа, функционируют электровозы трех моделей: ЭП – 1П; ВЛТК и ЕРМАК. Самым частым потребителем нагрузки в эксплуатации участка является электровоз марки ЕРМАК.

На основе структурной силовой схемы электровоза ЕРМАК [16] (Рисунок 3.4) были собраны две модели электровоза. Первая находится в двигательном режиме, а вторая в рекуперативном.

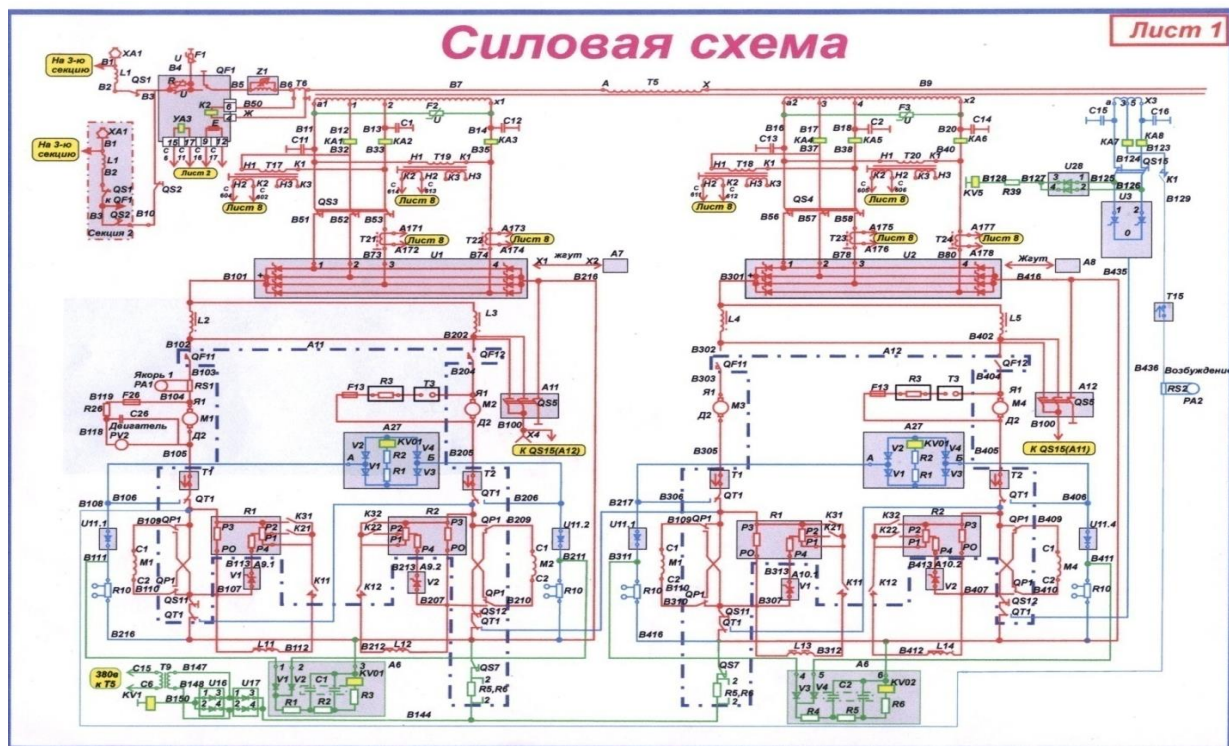


Рисунок 3.4 – Силовая структурная схема электровоза «ЕРМАК»

Модель электровоза «ЕРМАК» в двигательном режиме, преобразованная в подсистему «Elektrovoz» (Рисунок 3.6), соответствовала функциональной схеме электропривода тяги в двигательном режиме (Рисунок 3.5).



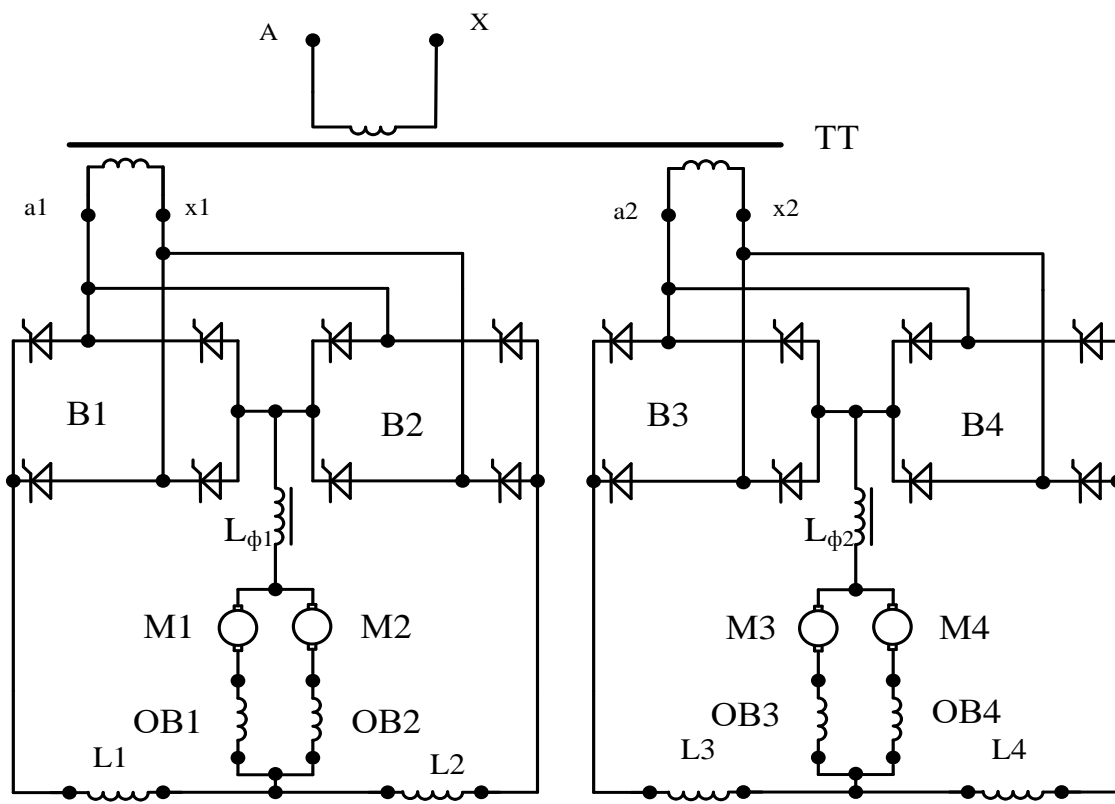


Рисунок 3.5 – Функциональная схема электропривода тяги в двигательном режиме

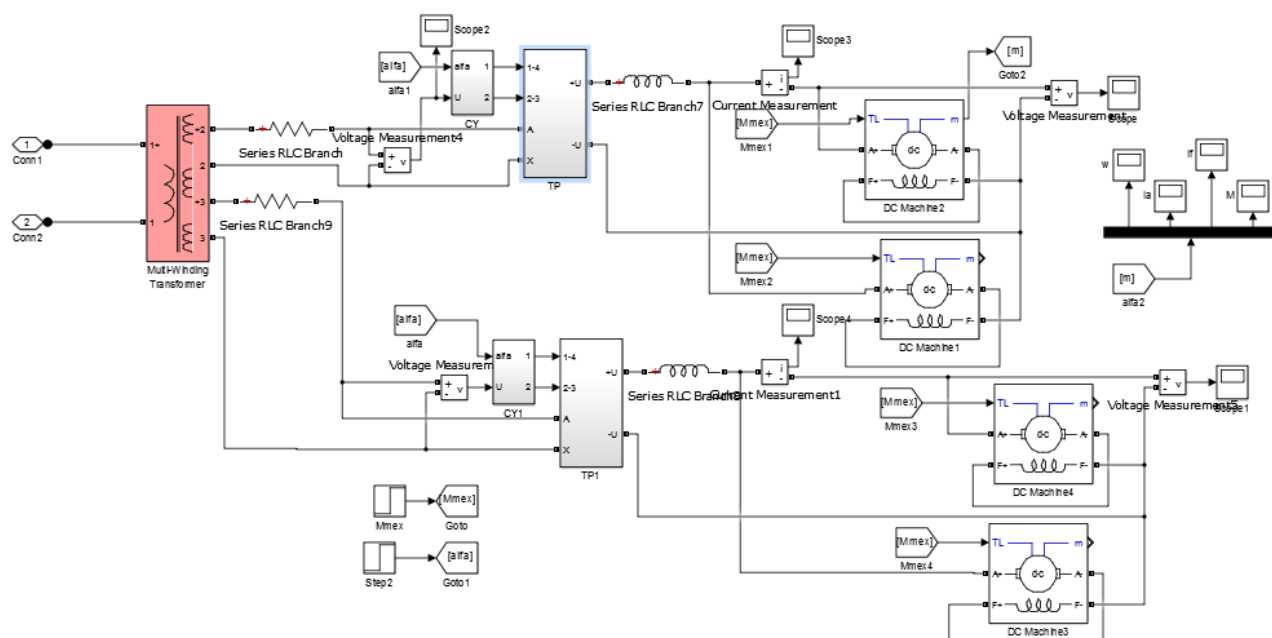
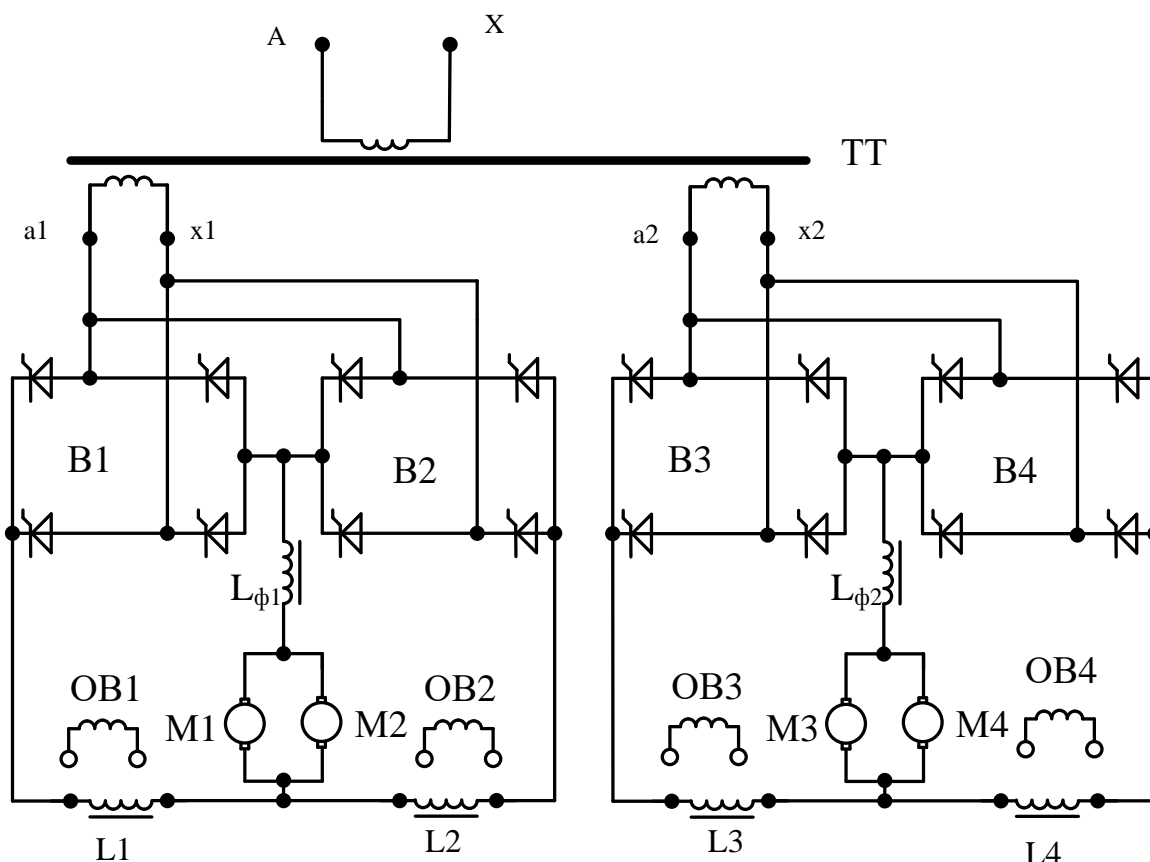


Рисунок 3.6 – Модель тягового электропривода в двигательном режиме, созданная при помощи графического моделирования пакета Simulink системы

Модель электровоза «ЕРМАК» в рекуперативном режиме, преобразованная в подсистему «Elektrovoz Rec» (Рисунок 3.8), соответствовала функциональной схеме электропривода тяги в рекуперативном режиме (Рисунок 3.7).



34

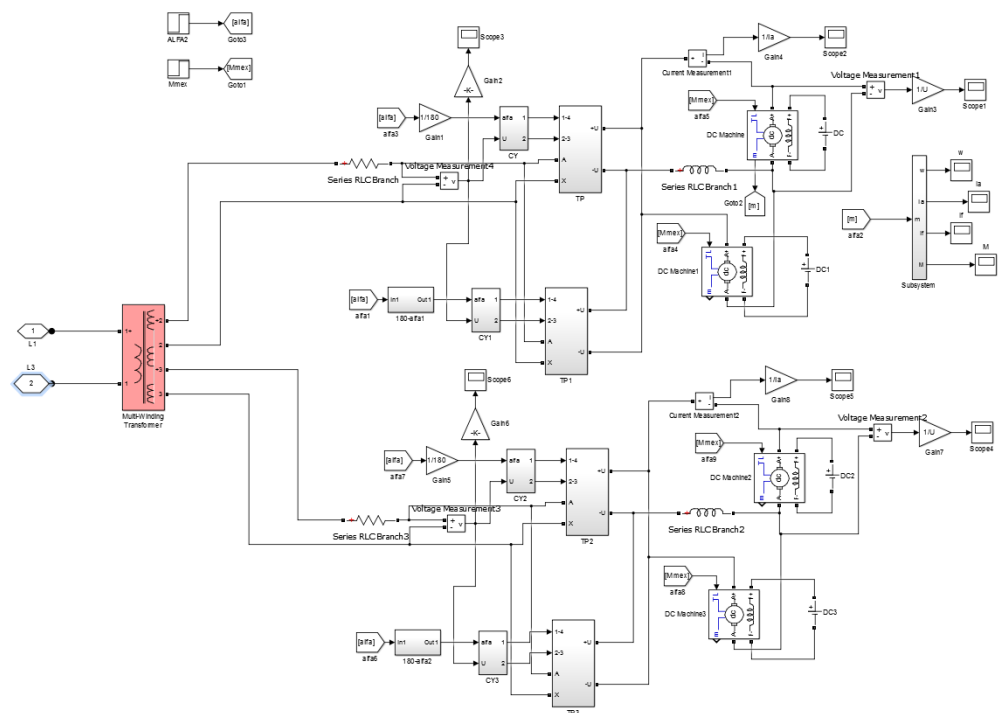


Рисунок 3.8 – Модель тягового электропривода в рекуперативном режиме, созданная при помощи графического моделирования пакета Simulink системы

Для обеспечения режима рекуперативного торможения, обмотка возбуждения, которая включена последовательно, отключается от якорной цепи и подключается к независимому источнику напряжения. В данном режиме электропривод под действием активного механического момента нагрузки разгоняется до скорости выше скорости холостого хода, противо-ЭДС двигателя становится выше выпрямленного напряжения тиристора, ток якоря меняет свое направление, а инверторная группа ВИП пропускает отрицательную полуволну напряжения [18].

Для моделирования электровоза в двигательном и в рекуперативном режимах были рассчитаны следующие параметры элементов модели: сопротивления обмоток и контура намагничивания тягового трансформатора электровоза; сопротивления обмоток якоря и возбуждения электродвигателей. Для упрощения моделей параллельно соединенные двигатели заменены одним эквивалентным. Все расчеты обмоток эквивалентного электродвигателя были произведены в М-файле (Приложение Д).

На электровозе ЕРМАК стоит трансформатор ОНДЦЭ – 4350/25. Номинальные данные тягового трансформатора электровоза «ЕРМАК» представлены в таблице 3.4 [19]. Расчет параметров выполнен по формулам (3.1 – 3.9). Результаты расчетов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 — Характеристики тягового электровоза ЕРМАК

Тип	S <sub>ном</sub> , МВА	U <sub>ном</sub> обмоток, кВ			u <sub>кз</sub> , %	ΔP <sub>кз</sub> , кВт	ΔP <sub>xx</sub> , кВт	I <sub>xx</sub> , %
		ВН	НН	НН				
ОНДЦЭ – 4350/25	4,345	25	1,26	1,26	12,5	46,5	15,5	0,55

$$I_{\text{ном}} = \frac{4,345}{25} \cdot 10^3 = 173,8 \text{ (A)};$$

$$U_{\text{кзВН}} = \frac{25 \cdot 12,5}{100} = 3,125 \text{ (кВ)};$$

$$U_{\text{кзНН}} = \frac{1,26 \cdot 12,5}{100} = 0,1575 \text{ (кВ)};$$

$$I_{\text{xx}} = \frac{173,8 \cdot 0,55}{100} = 0,96 \text{ (A)};$$

$$\varphi_{\text{кз}} = \arccos \frac{46,5}{3,125 \cdot 173,8} = 85,1^\circ;$$

$$\varphi_{\text{xx}} = \arccos \frac{15,5}{25 \cdot 0,96} = 49,8^\circ;$$

$$R_m = \frac{4,345}{25 \cdot 0,96 \cdot \cos 49,8} \cdot 10^3 = 280,5 \text{ (о. е)};$$

$$L_m = \frac{4,345}{25 \cdot 0,96 \cdot \sin 49,8} \cdot 10^3 = 237,03 \text{ (о. е)};$$

$$R_1 = R'_2 = R'_3 = \frac{4,345 \cdot 3,125 \cdot \cos 85,1}{2 \cdot 25^2 \cdot 173,8} \cdot 10^3 = 0,0053 \text{ (о. е)};$$

$$L_{p1} = \frac{4,345 \cdot 3,125 \cdot \sin 85,1}{2 \cdot 25^2 \cdot 173,8} \cdot 10^3 = 0,062 \text{ (о. е)};$$

$$L_{p2} = L'_{p2} = \frac{4,345 \cdot 0,1575 \cdot \sin 85,1}{2 \cdot 1,26^2 \cdot 173,8} \cdot 10^3 = 1,24 \text{ (о. е)}.$$

Таблица 3.5 – Расчетные параметры трансформатора ЭПС

I <sub>ном</sub> , А	U <sub>кз</sub> , кВ		I <sub>xx</sub> , А	φ <sub>xx</sub> , °	φ <sub>кз</sub> , °	R <sub>м</sub> , о.е.	L <sub>м</sub> , о.е.	R, о.е	L <sub>p</sub> , о.е.	
	ВН	НН							ВН	НН
173,8	3,125	0,1575	0,96	49,8	85,1	280,5	237,03	0,0053	0,062	1,24

#### **4 Исследование режимов работы тяговой сети участка Бискамжа – Камышта Красноярской железной дороги**

Исследуемый участок железной дороги условно можно разделить на две составляющей части: Бискамжа – Югачи и Югачи – Камышта. Условное разделение участков производится по границам тяговой подстанции Югачи. На тяговой подстанции Бискамжа компенсация реактивной мощности присутствует, в то время как на оставшихся двух подстанциях компенсация отсутствует. Отсутствие компенсации на участке Югачи – Камышта, объясняется тем, что этот участок является равнинным и на нем отсутствуют резкие перепады мощности в работе ЭПС. По этой самой причине участок Югачи – Камышта моделироваться не будет.

На участке Бискамжа – Югачи присутствует как продольная, так и поперечная компенсация реактивной мощности. Устройства поперечной компенсации установлены на шинах 27,5кВ тяговой подстанции Бискамжа. Продольная компенсация установлена в начале отсасывающей линии тяговой подстанции Бискамжа.

Проведем исследование режимов контактной сети при различных местах прохождения ЭПС и различных режимах работы привода электроподвижного состава.

##### **4.1 Исследование режимов работы тяговой сети при прохождении двух ЭПС по обоим путям Нанхчульского тоннеля**

Было произведено моделирование режима контактной сети, при котором по путям Нанхчульского тоннеля следовало два ЭПС одновременно. В таблице 4.1 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования при прохождении электропоездов по двум соседним путям в Нанхчульском тоннеле.

Таблица 4.1 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении электровозов по двум соседним путям в Нанхчульском тоннеле

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9373	0,9276	–	0,9025	0,9199	0,9376
2	0,9373	0,928	0,8942	0,8925	0,9317	0,9376

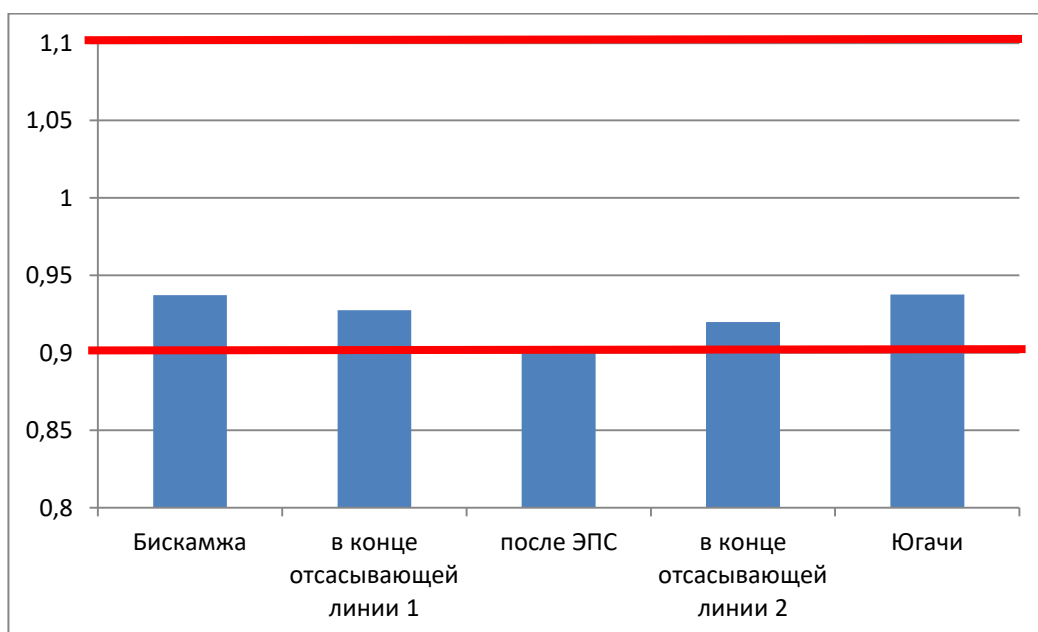


Рисунок 4.1 – Гистограмма напряжений на первом пути

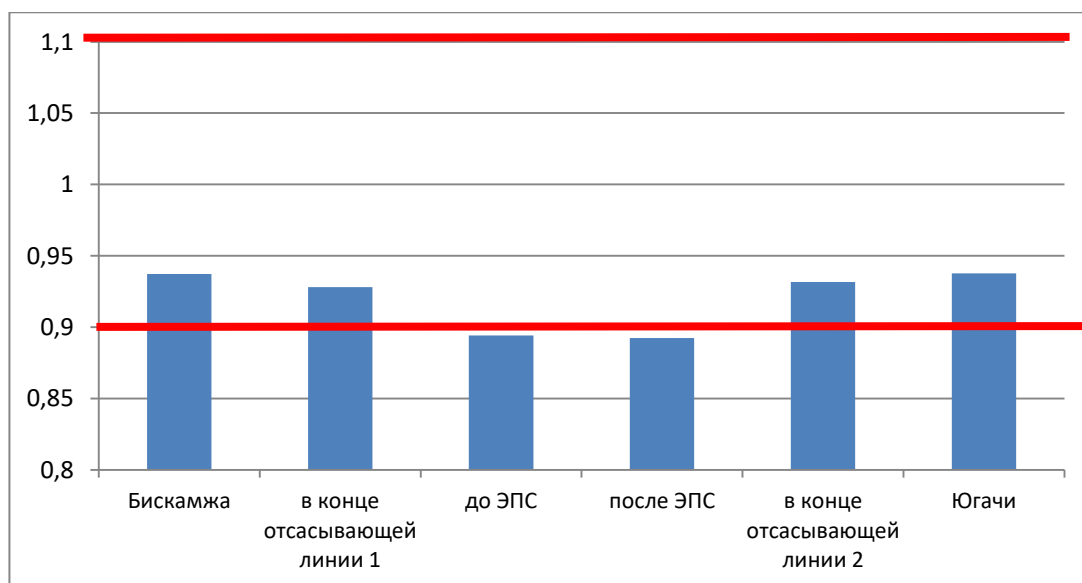


Рисунок 4.2 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.3 – 4.4 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования при прохождении электровозов по двум соседним путям в Нанхчульском тоннеле.

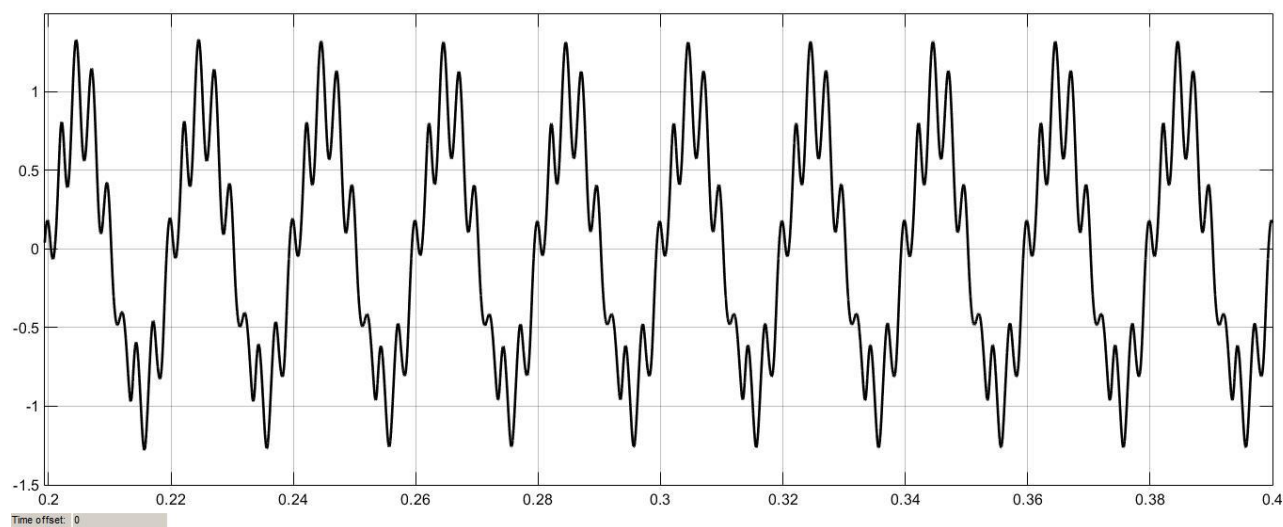


Рисунок 4.3 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

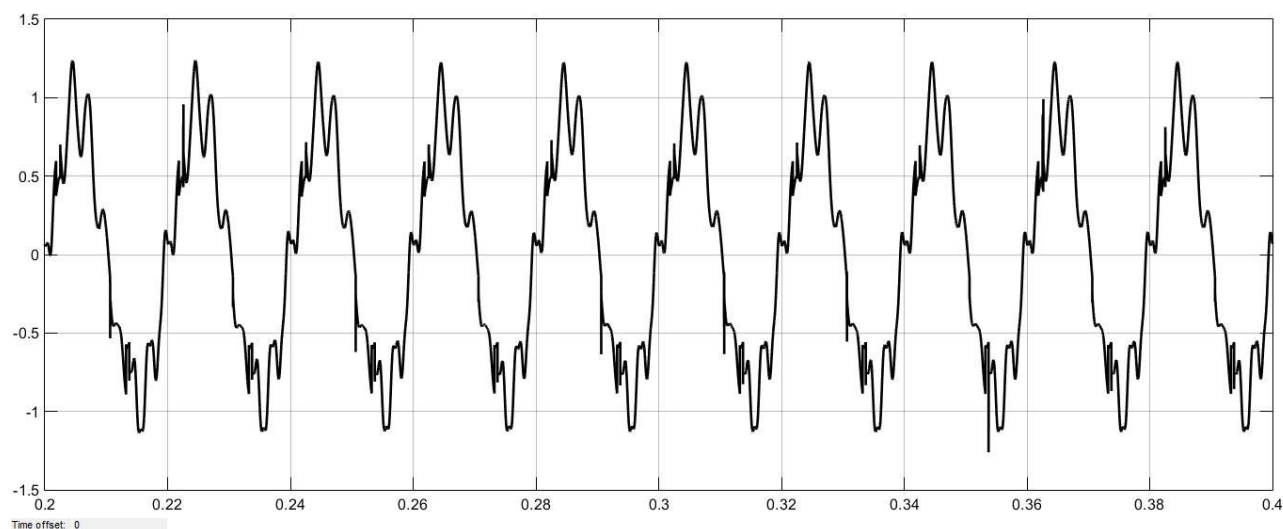


Рисунок 4.4 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

Преимуществом применения библиотеки SimPowerSystems пакета Simulink является удобство проведения гармонического анализа напряжения. Для гармонического анализа в схеме применяется блок Powergui, являющийся инструментом графического интерфейса пользователя. С этой целью в модели организован выход исследуемых сигналов в рабочую область MATLAB с

помощью блоков To Workspace. Формат выводимых данных в блоке задан как Structure With Time.

Результаты гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровазов на путях Нанхчульского тоннеля сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	3,28	5,68	6,38	2,06
5	4	1,8	2,49	2,89	0,95
7	3	6,41	6,06	6,14	2,29
9	1	0,81	0,27	0,17	0,09
11	2	1,95	1	1,47	0,54
13	2	1,34	2,05	2,52	1,18
15	1,5	0,7	1,88	2,26	1,31

По данным таблицы 4.2 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, по сравнению с ГОСТ [20], для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.5 – 4.8.

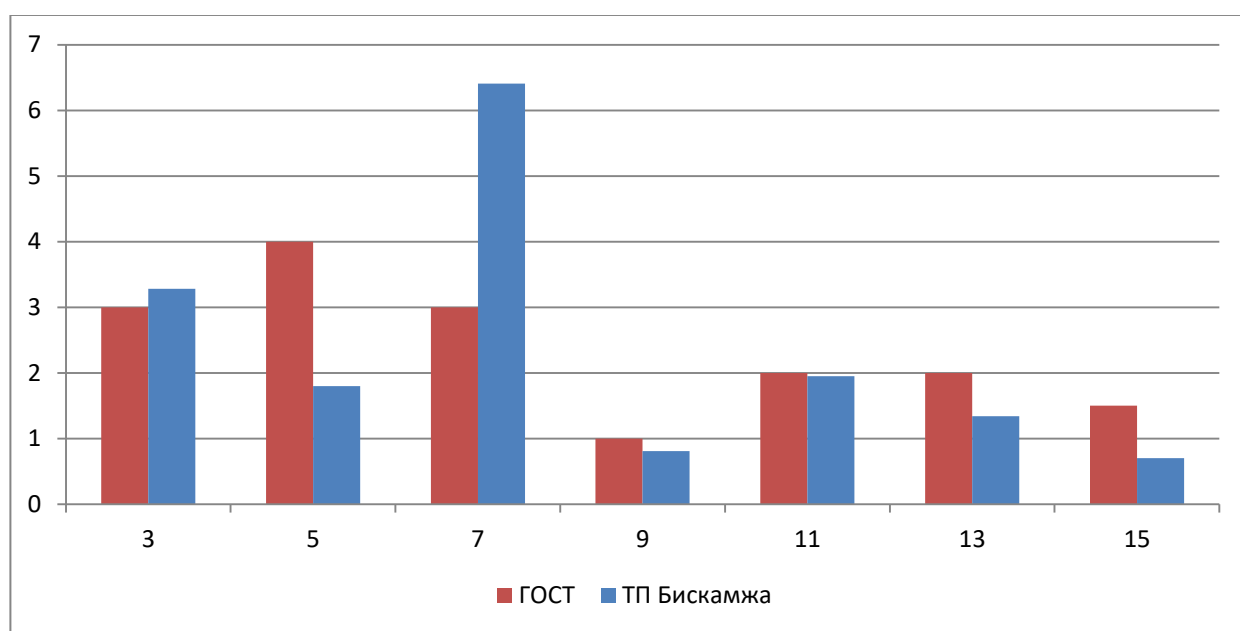


Рисунок 4.5 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа



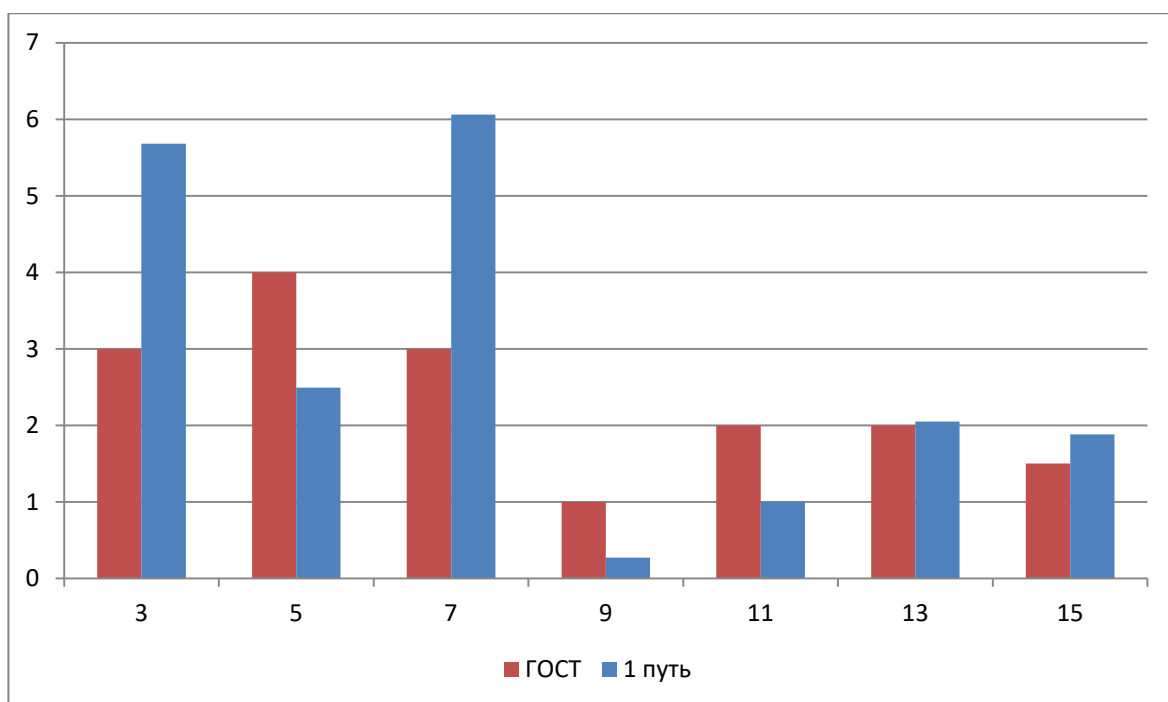


Рисунок 4.6 – Гармонический состав напряжения на первом пути  
Нанхчульского тоннеля

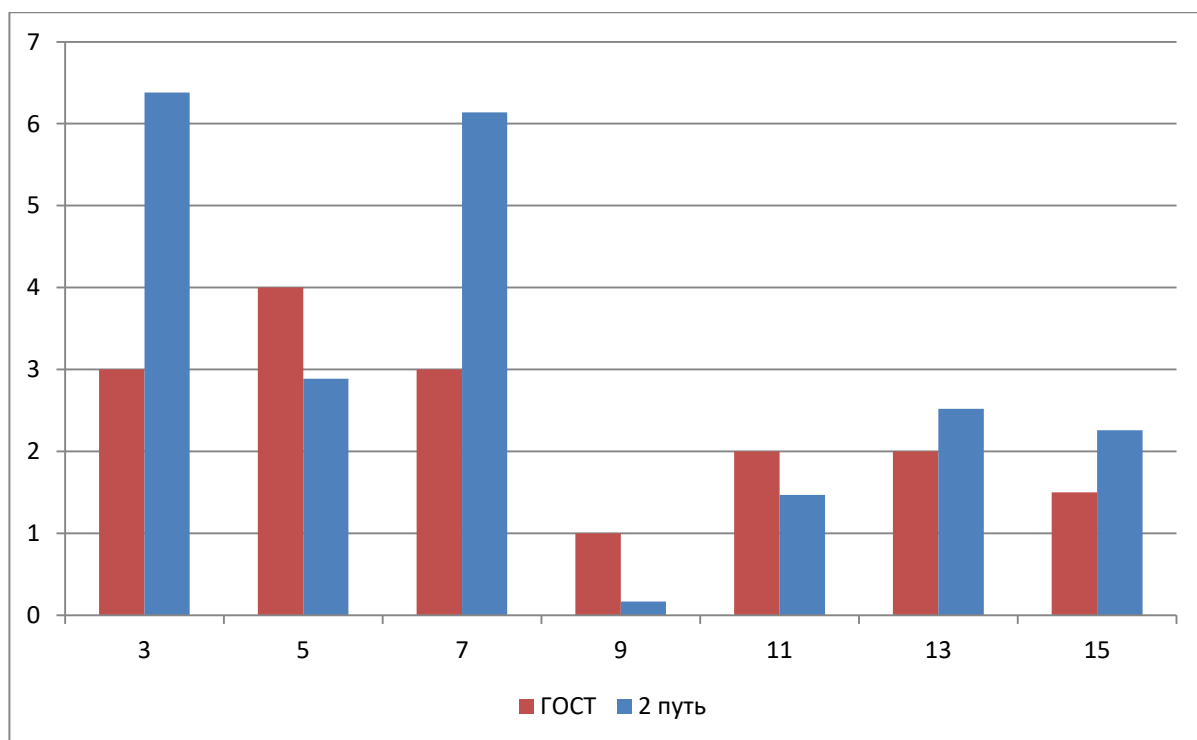


Рисунок 4.7 – Гармонический состав напряжения на втором пути  
Нанхчульского тоннеля

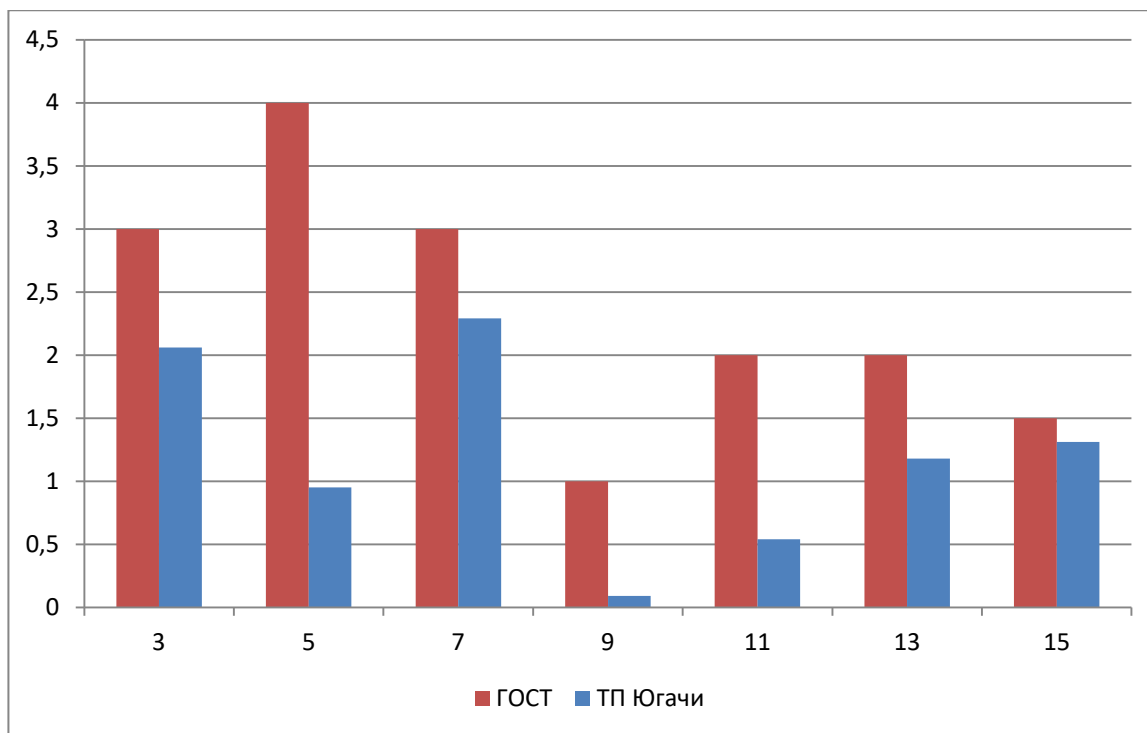


Рисунок 4.8 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаются провалы напряжения более 10% на зажимах тягового трансформатора ЭПС, при его прохождении по Нанхчульскому тоннелю;
2. Вследствие нелинейности нагрузки ЭПС, происходят значительные искажения синусоиды напряжения;
3. На ТП Югачи гармонический состав находится в пределах ГОСТ;
4. В остальных местах контактной сети наблюдается превышение нормированной величины процентного содержания гармоник №3 и 7;
5. В месте прохождения ЭПС по путям Нанхчульского тоннеля, происходит дополнительное превышение значения нормированной величины процентного содержания гармоник № 13 и 15;
6. Гармонический состав ухудшается по мере приближения ЭПС к точке замеров напряжения.

## 4.2 Исследование режимов работы тяговой сети при прохождении двух ЭПС по обоим путям Нанхчульского тоннеля и одного ЭПС у ТП Югачи

Было произведено моделирование режима контактной сети, при котором по путям Нанхчульского тоннеля одновременно следовало два ЭПС, а также еще один ЭПС проходил у ТП Югачи. Третий ЭПС проходит первому пути. В таблице 4.3 представлены величины напряжений в различных точках участка контактной сети, полученные в результате моделирования.

Таблица 4.3 – Напряжения в различных точках контактной сети, при прохождении трех электровозов

Путь	Напряжение, о.е.					
	Бискамжа	в конце отсасывающей линии 1	до ЭПС	после ЭПС	в конце отсасывающей линии 2	Югачи
1	0,9256	0,9099	–	0,8663	0,8668	0,9208
2	0,9256	0,9151	0,8772	0,8751	0,9149	0,9208

По данным таблицы 4.3 были построены гистограммы напряжений в разных точках КС, для обоих путей. Гистограммы представлены на рисунках 4.9 и 4.10.

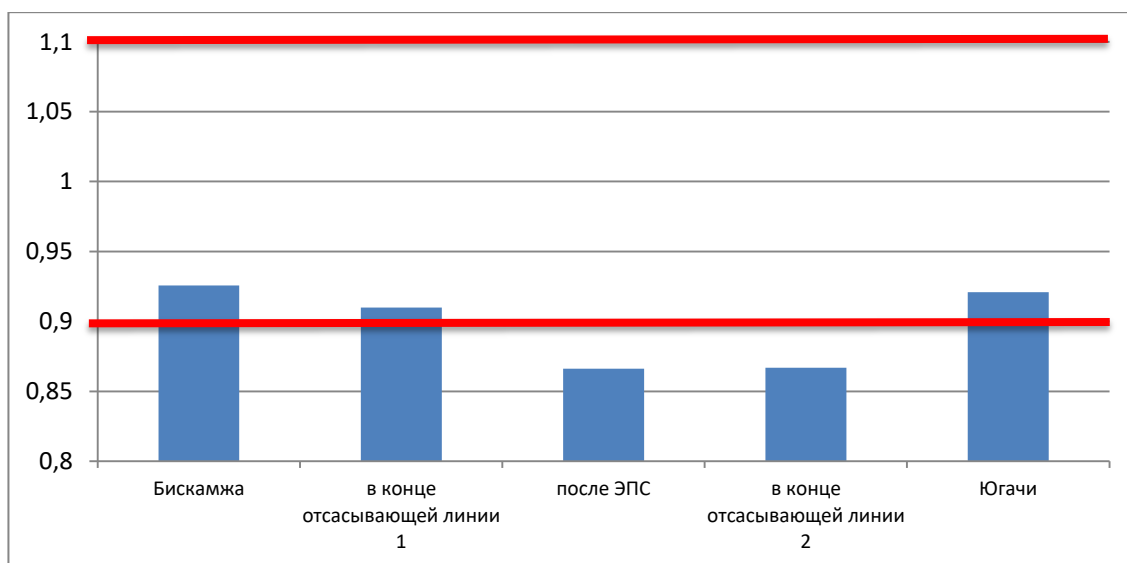


Рисунок 4.9 – Гистограмма напряжений на первом пути

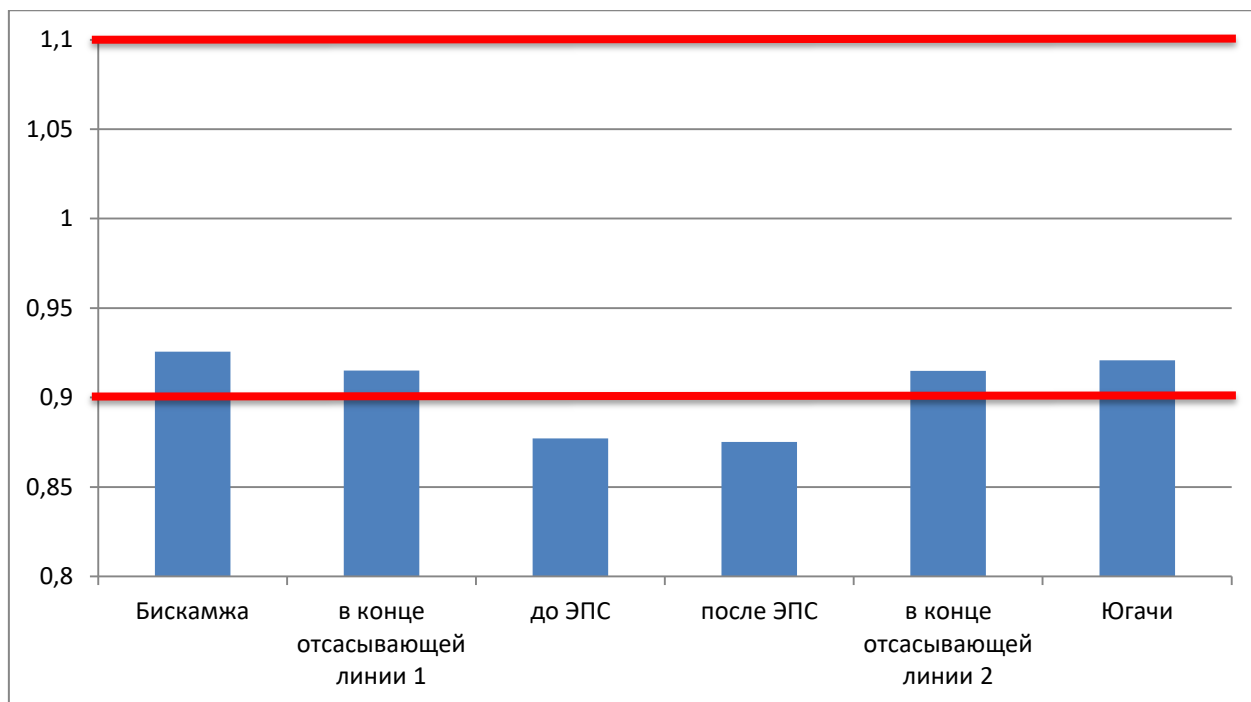


Рисунок 4.10 – Гистограмма напряжений на втором пути

На рисунках 4.11 – 4.12 представлены осциллограммы напряжения, построенные по результатам моделирования.

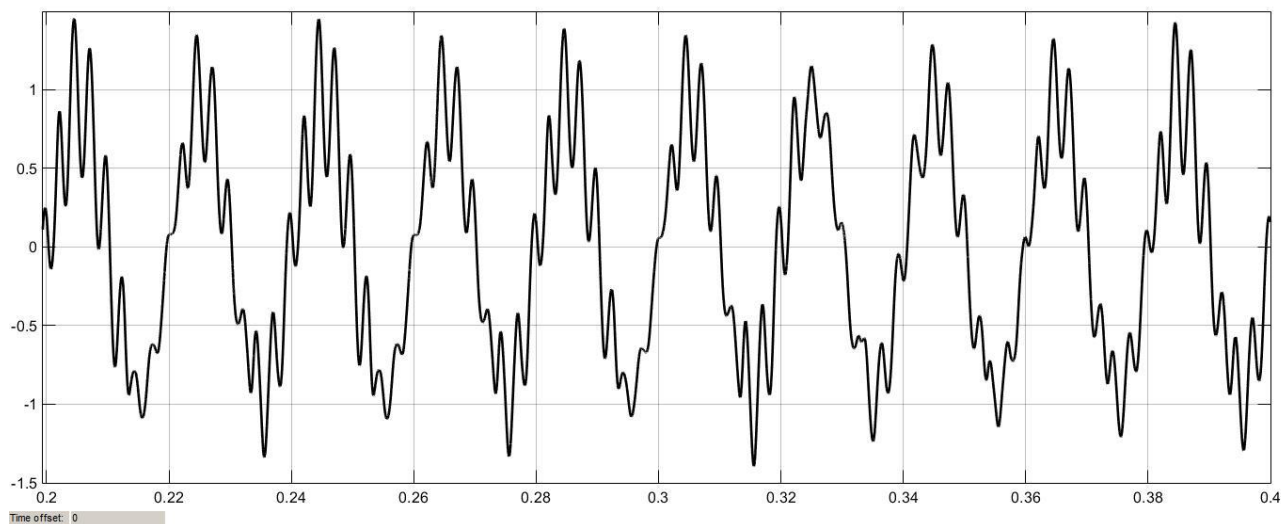


Рисунок 4.11 – Осциллограмма напряжения на шинах 27кВ ТП Бискамжа

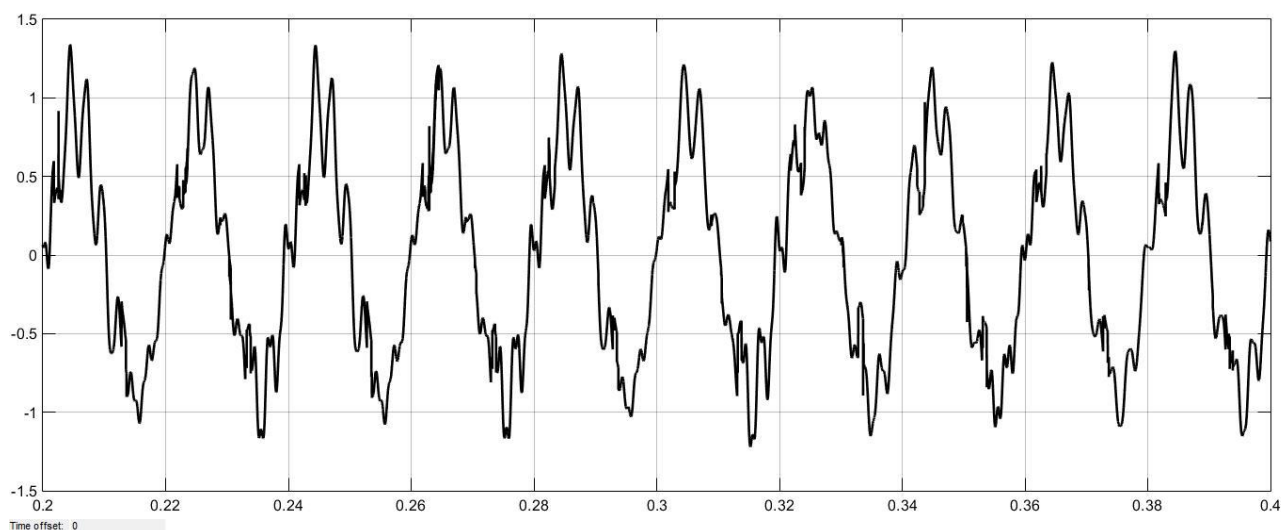


Рисунок 4.12 – Осциллограмма напряжения в месте прохождения ЭПС

В соответствии с результатами гармонического анализа осциллограмм напряжения на шинах 27 кВ тяговых подстанций и в местах прохождения электровозов, была составлена таблица 4.4.

Таблица 4.4 – Гармонический состав напряжения

№ гармоники	ГОСТ, %	Процентное содержание гармоник			
		ТП Бискамжа	1 путь	2 путь	ТП Югачи
3	3	4,4	8,77	7,7	3,6
5	4	4,14	6,85	5,62	2,82
7	3	11,65	11,87	10,6	4,72
9	1	1,81	0,24	0,76	0,23
11	2	0,87	0,43	0,93	0,35
13	2	0,88	1,4	1,73	1,09
15	1,5	0,49	1,54	1,57	1,31

По данным таблицы 4.4 были составлены сравнительные гистограммы гармонического состава, для каждой точки измерения напряжения в контактной сети. Гистограммы представлены на рисунках 4.13 – 4.16.

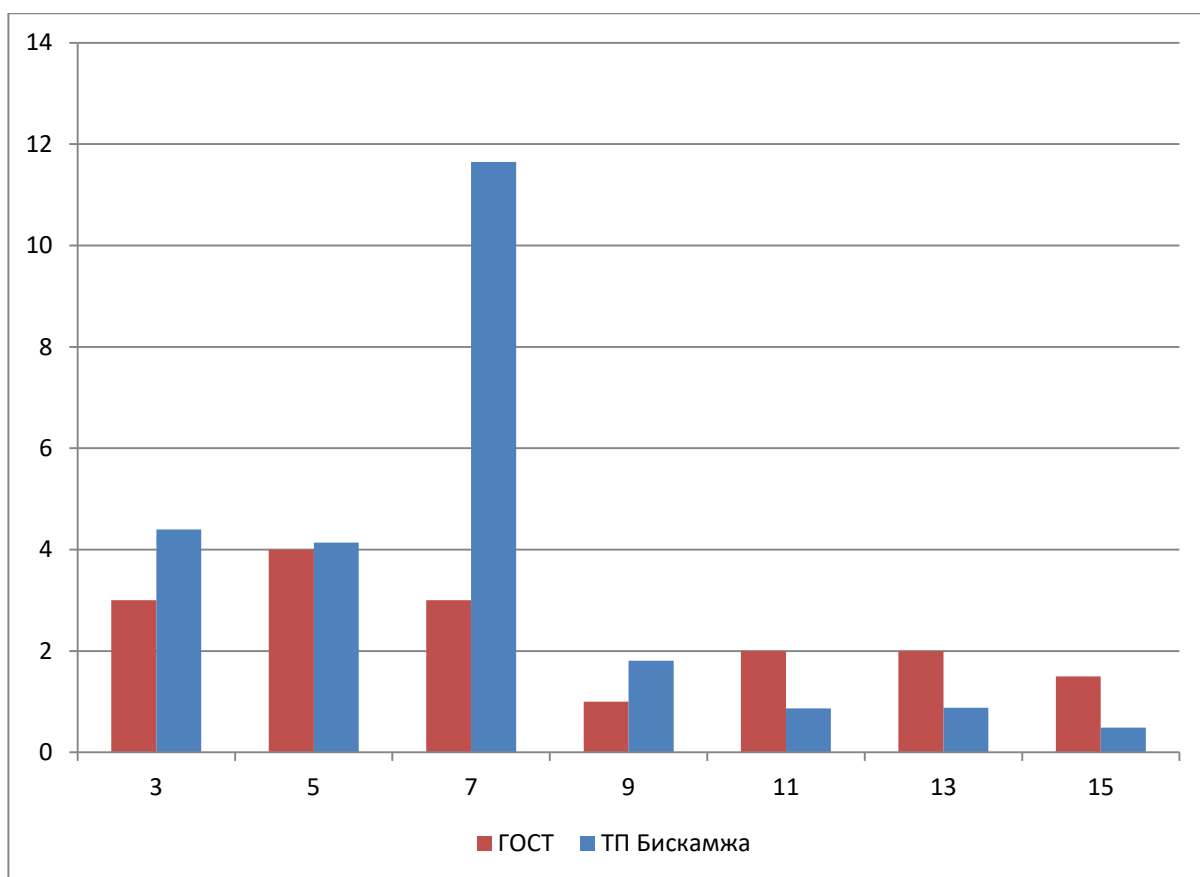


Рисунок 4.13 – Гармонический состав напряжения на шинах 27 кВ ТП Бискамжа

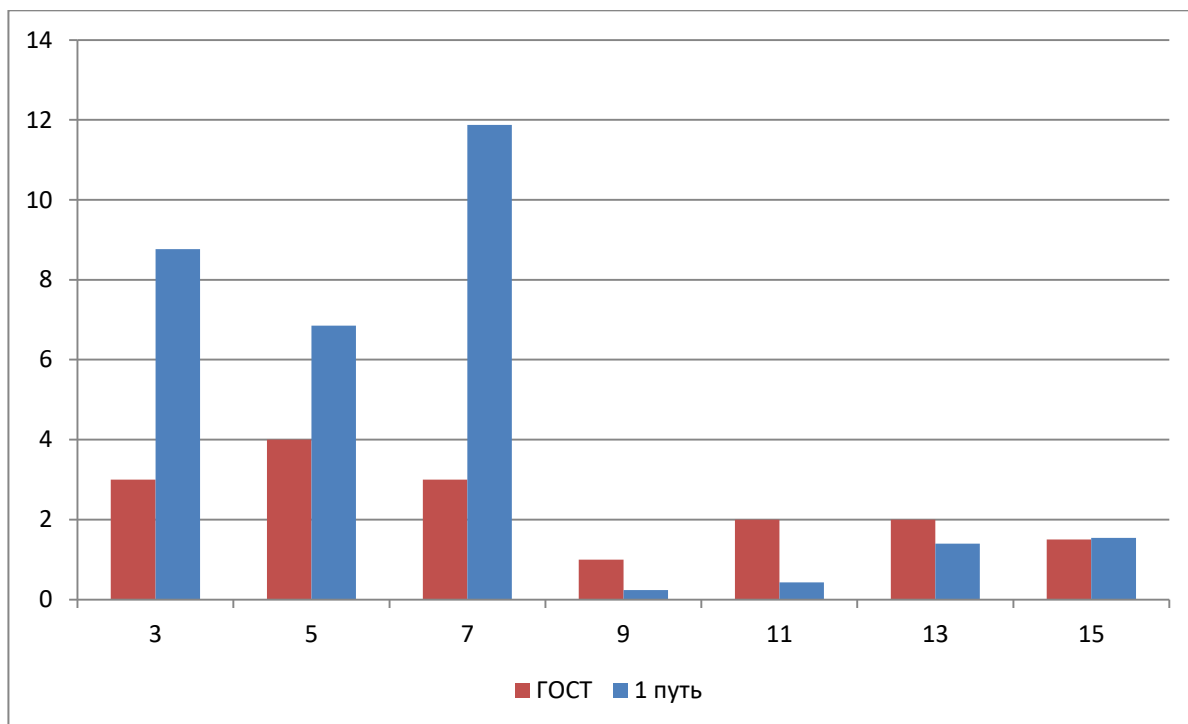


Рисунок 4.14 – Гармонический состав напряжения на первом пути Нанхчульского тоннеля

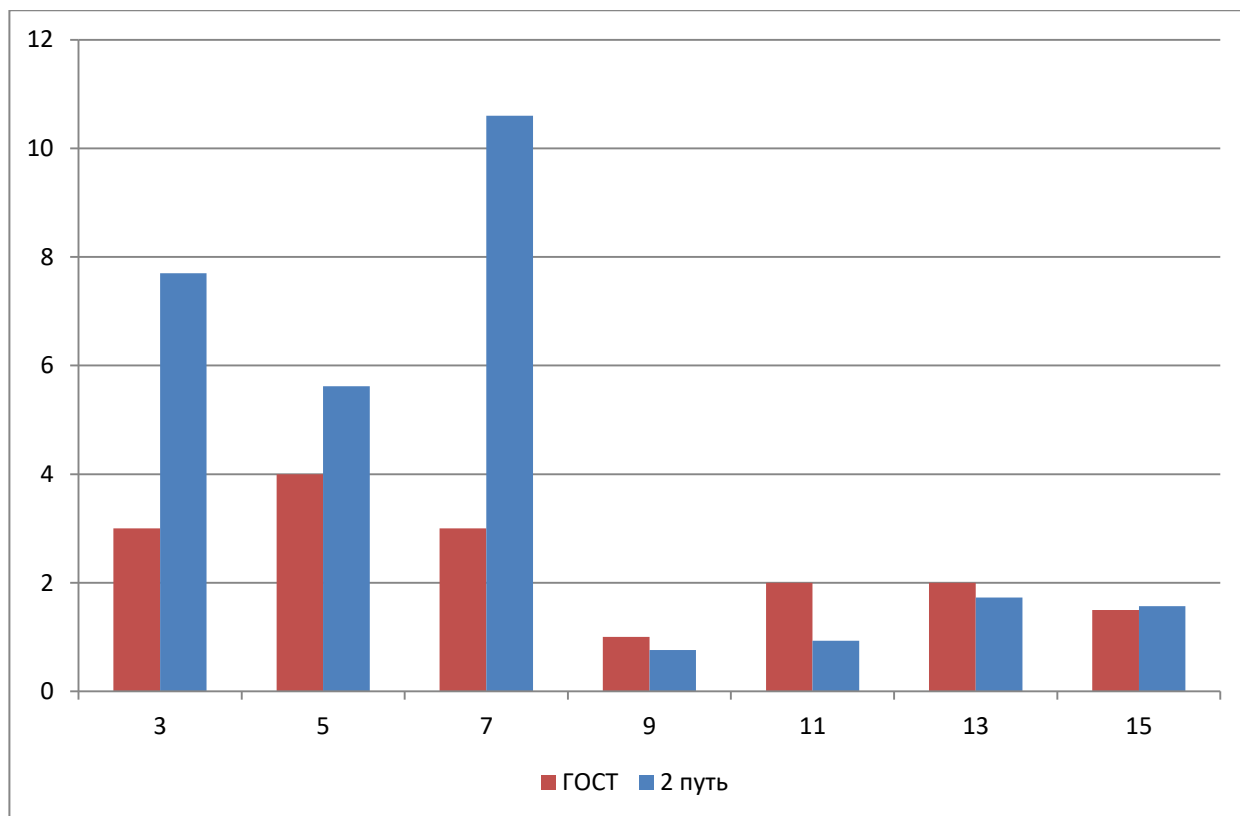


Рисунок 4.15 – Гармонический состав напряжения на втором пути  
Нанхчульского тоннеля

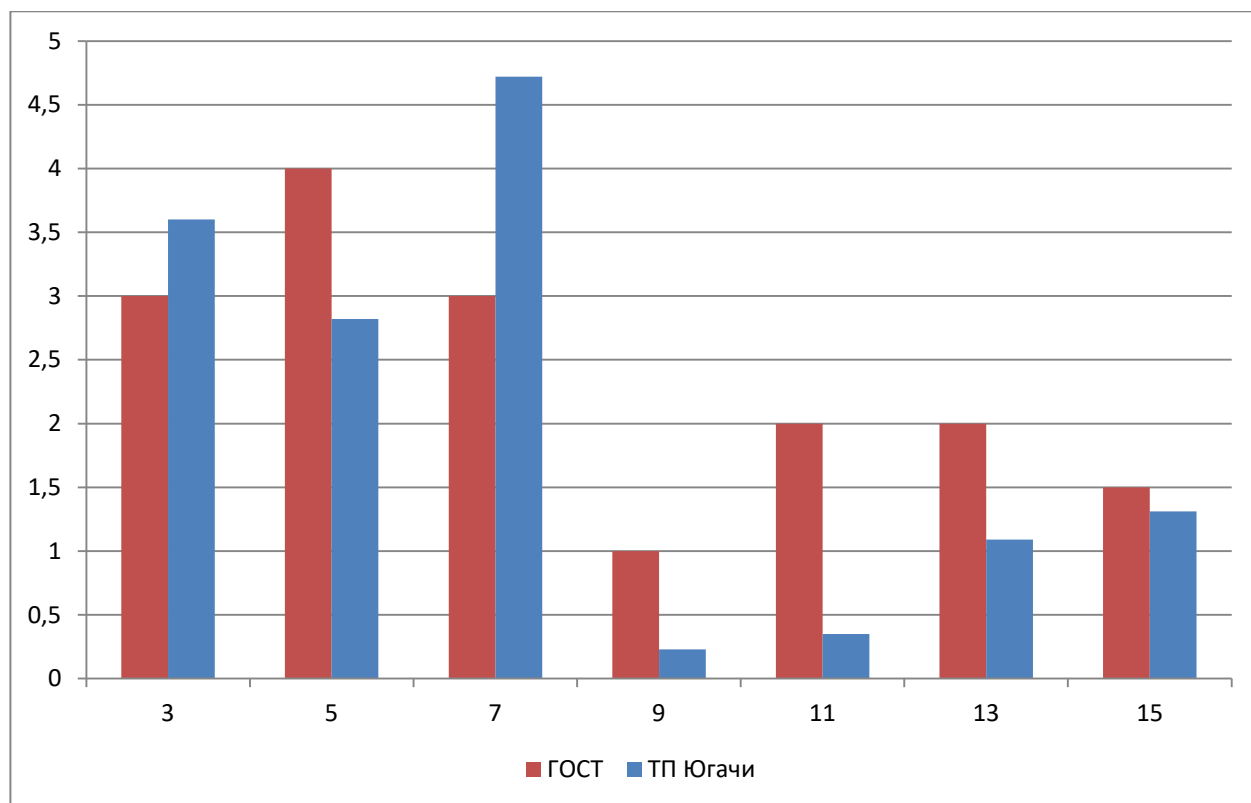


Рисунок 4.16 – Гармонический состав напряжения на ТП Югачи

На основании моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаются провалы напряжения более 10% на зажимах тяговых трансформаторов ЭПС;
2. Из-за увеличения числа ЭПС на участке КС, искажение синусоиды значительно увеличивается;
3. На ТП Югачи, при прохождении ЭПС, гармонический состав выходит за пределы ГОСТ;
4. В месте прохождения ЭПС, по путям Нанхчульского тоннеля, наблюдается нормированной величины процентного содержания гармоник № 3, 5, 7 и 15.
5. На ТП Бискамжа наблюдается дополнительное превышение процентного содержания гармоники №9;
6. Гармонический состав ухудшается по мере приближения ЭПС к точке замеров напряжения.

На основании вышеперечисленных умозаключений можно прийти к выводу, что в КС требуется установка управляемых фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) [21]. Это объясняется тем, что нагрузка в КС имеет нелинейный, несимметричный и непостоянный характер, а наличие высших гармоник требует их фильтрации.



## 5 Поиск возможных путей решения

Из результатов моделирования видно, что в контактной сети возникают высшие гармоники, которые значительно выходят за пределы нормативных величин, которые установлены ГОСТ 32144-2013. Известно, что электроэнергетическая система должна обеспечивать потребителя энергией достойного качества, но, к сожалению, в контактных сетях данное требование не может выполняться, в связи с проблемной нагрузкой [22]. Нагрузка в контактных сетях является нелинейной, несимметричной и непостоянной. Требуется компенсация реактивной мощности с фильтрацией гармоник. При этом необходимо управление ФКУ, т.к. ее постоянная работа в сети необязательна.

Первым вариантом решения проблемы является установка фильтрокомпенсирующих устройств с широкополосным фильтром [23], что позволит значительно уменьшить процентное содержание гармоник в сети.

Вторым вариантом является установка устройств из разряда «Умные сети» [24] или SMART GRID [25]. Данный вариант позволит не только повысить качество электроэнергии в сети, но и управлять режимами работы самого компенсирующего устройства. Например, установка на тяговую подстанцию статического тиристорного компенсатор реактивной мощности (СТК) [26]. Он позволит снизить колебания напряжения, повысить коэффициент мощности, сбалансировать нагрузку и снизит токи высших гармоник.

Устройство СТК представляет собой набор фильтров высших гармоник – фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), постоянно подключенных к сети или коммутируемых выключателями, и включенные параллельно им в треугольник три фазы управляемых тиристорами реакторов – тиристорно-реакторная группа (ТРГ). Угол зажигания тиристоров ТРГ может быстро изменяться таким образом, что ток в реакторе отслеживает ток нагрузки или реактивную

мощность в энергосистеме. Принципиальная схема СТК с его регулировочной характеристикой представлена на рисунке 5.1.

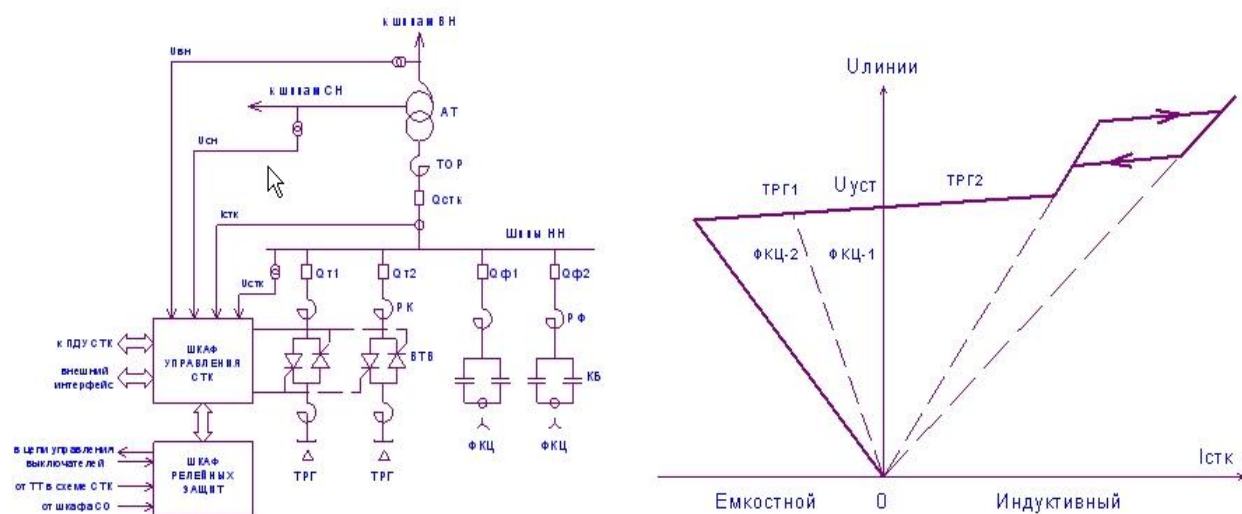


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема СТК с регулировочной характеристикой

Еще одним подходящим устройством типа SMART GRID является статический компенсатор СТАТКОМ [27]. По сравнению с СТК, статический компенсатор СТАТКОМ имеет ряд преимуществ:

- Лучшие динамические характеристики;
- Возможность поддержания номинального емкостного выходного тока при низком напряжении системы, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую динамическую устойчивость передачи по сравнению с СТК;
- Благодаря высокой частоте переключения приборов, СТАТКОМ может осуществлять активную фильтрацию гармонических токов нагрузки;
- Требуется меньше места для установки (приблизительно в два раза по сравнению с СТК);
- Меньший уровень активных потерь.

СТАТКОМ представляет собой управляемый источник напряжения (УИН) с внутренним сопротивлением, практически равным нулю. Его подключение к сети производится через линейный реактор, обеспечивающий

преобразование разности напряжений сети и УИН в выходной ток СТАТКОМа, т.е. превращения источника напряжения в источник тока. Принципиальная схема устройства СТАТКОМ представлена на рисунке 5.2.

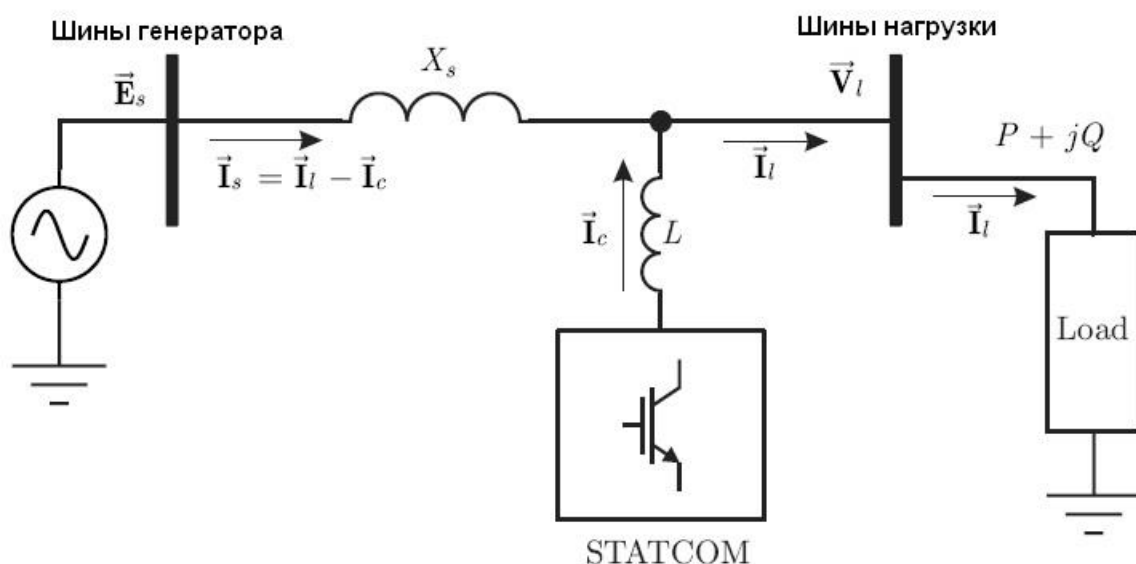


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема СТАТКОМ

Для контактных сетей, в эксплуатации будет выгоден многоуровневый СТАТКОМ. Он подключается на шины тяговой подстанции 27,5 кВ. Он позволит вредное воздействие быстропеременных нагрузок и повысит динамическую устойчивость в сетях.

В случае подключения СТАТКОМа в бестрансформаторном режиме, т.е. напрямую в КС, то возможно применение многоуровневых преобразователей. Например, применение преобразователя на основе Н-мостов. Важнейшим достоинством данной конфигурации является её модульность, что позволяет легко производить масштабирование СТАТКОМа при переходе к различным уровням напряжения и облегчает условия эксплуатации и обслуживания электроустановки.

На рисунке 5.3 изображена, в качестве примера, фаза 7-ми уровневой преобразователя на базе Н-моста и форма его выходного напряжения в режиме

генерации реактивной мощности. Для каскадного многоуровневого инвертора полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей Н-мостов. Каждое отдельное выходное напряжение получается с использованием ШИМ модуляции со сдвигом фазы коммутации для каждого моста. Особенностью данной конфигурации преобразователя является то, что при увеличении класса напряжения, а, следовательно, и числа последовательно включенных Н-мостов, форма выходного напряжения все более приближается к идеальной синусоиде.

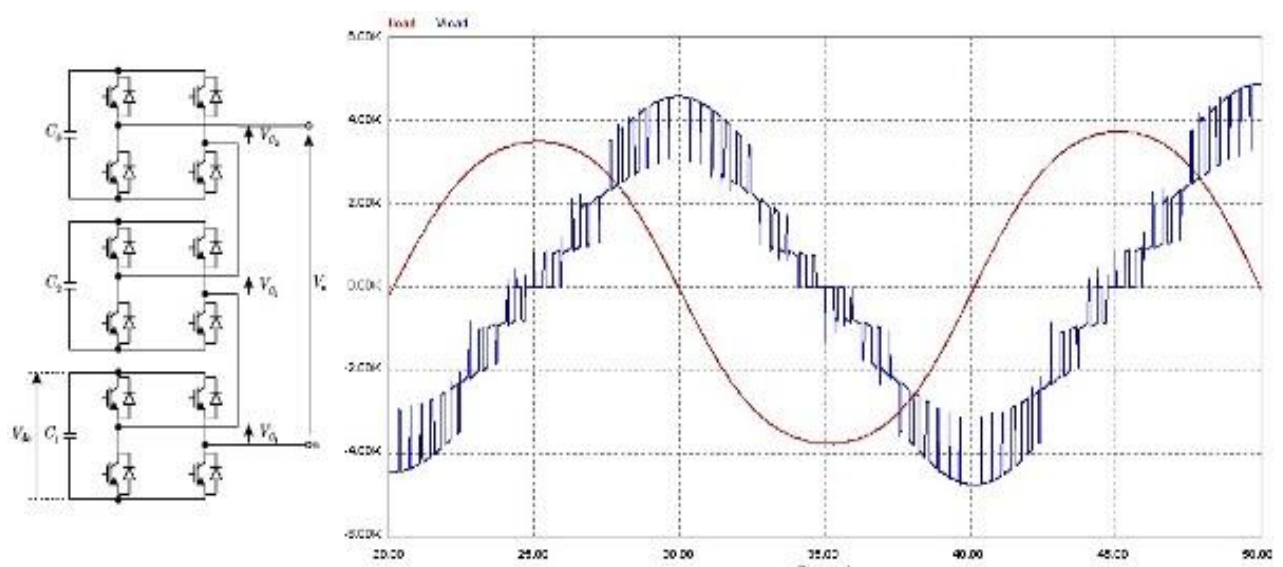


Рисунок 5.3 – Фаза 7-ми уровневого преобразователя на базе Н-моста и форма выходного напряжения в режиме генерации реактивной мощности.

Применение управляемых фильтрокомпенсирующих устройств значительно улучшит качество электроэнергии в контактной сети 27,5 кВ, и как следствие убережет оборудование тяговой сети от неисправностей в эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, было выполнено моделирование системы тяговой сети. За основу был взят участок Камышта – Бискамжа Красноярской железной дороги. Модель была выполнена при помощи системы MATLAB пакета Simulink и его библиотеки элементов SimPowerSistems.

Процесс создания модели тягового электроснабжения был разделен на несколько этапов, с целью отладки каждого элемента математическо-графической модели сети. Это позволило добиться предельно приближенных к реальности результатам.

Моделирование показало, что в контактной сети необходима установка управляемых фильтрокомпенсирующих устройств, с целью улучшения качества электроэнергии для тяговых потребителей. Данная необходимость объясняется тем, что тяговый потребитель, которым является ЭПС, имеет нелинейный, однофазный характер.

Улучшение качества электроэнергии позволит тяговым потребителям работать в бесперебойном режиме.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ТП – тяговая подстанция;  
ЭПС – электроподвижной состав;  
ПЛ – питающая линия;  
КС – контактная сеть;  
ОЛ – отсасывающая линия;  
НВ – нейтральная вставка;  
НП – нетяговый потребитель;  
ИС – изолирующее сопряжение;  
ДПР – система два провода – рельс;  
СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка;  
КУ – компенсирующее устройство;  
ППК – поперечная компенсация;  
ПДК – продольная компенсация;  
ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь;  
ФКУ – фильтро-компенсирующие устройства;  
СТК – статический тиристорный компенсатор реактивной мощности;  
ТРГ – тиристорно-реакторная группа;  
ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

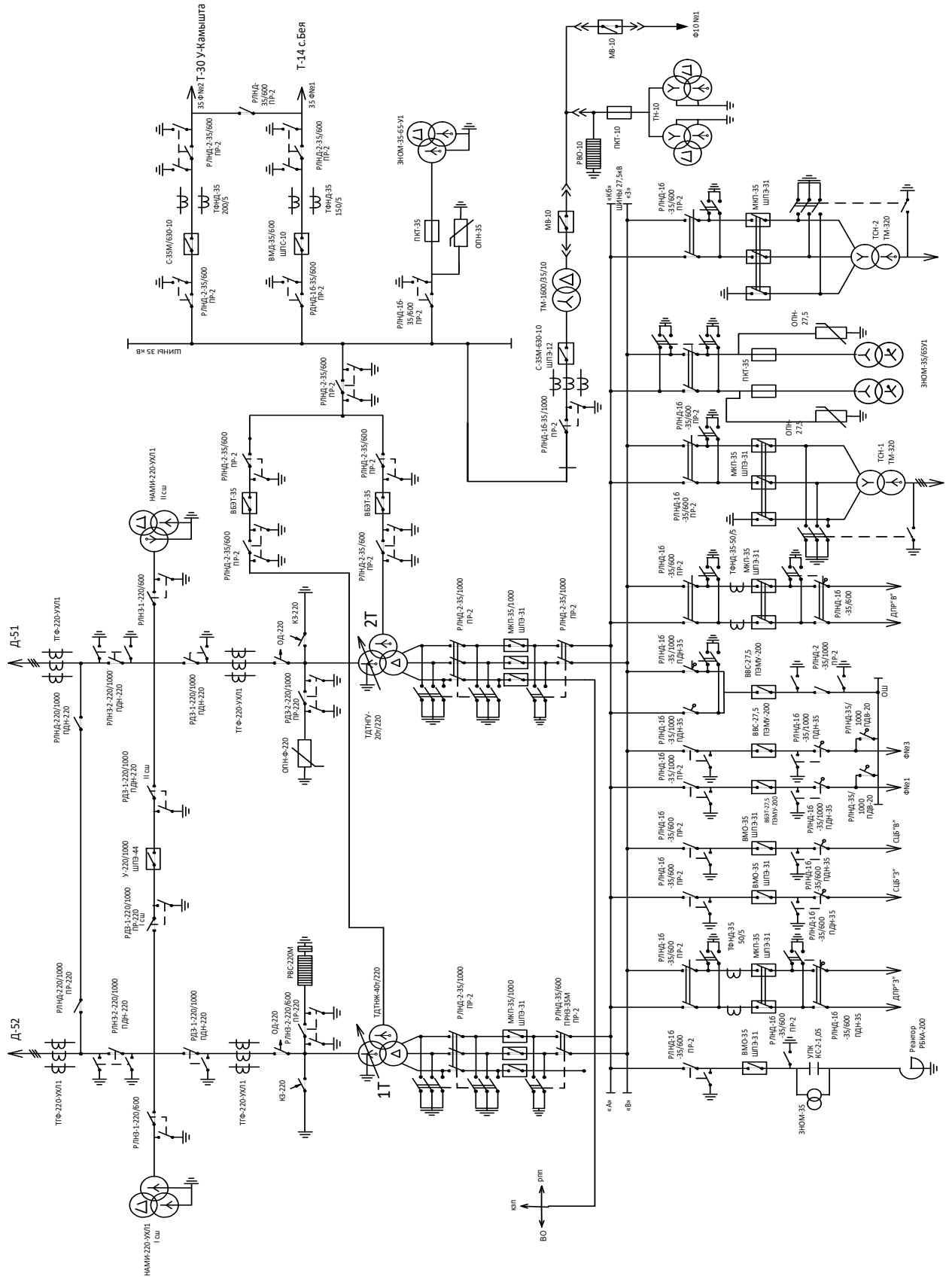
1. Железнодорожный справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://вики.жд.рф/wiki/ЖД\\_@\\_РФ](http://вики.жд.рф/wiki/ЖД_@_РФ)
2. Бей, Ю. М. Тяговые подстанции [Текст] : учебник для вузов ж.д. транспорта / Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. – М. : Транспорт, 1989 – 319 с.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 03.04.2012 N 651р. Об утверждении и вводе в действие документа «Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания» [текст].
4. Пантелев, В. И. ЭМС для технических систем, электрических сетей, систем электроснабжения рельсового транспорта, подземных коммуникаций: учеб. пособие в 3 частях. Ч .1. Электромагнитное влияние / В. И. Пантелев, В. Н. Яковлев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 302с.
5. Хорошилов, Н. В. Электропитающие системы и электрические сети [Текст]: учебное пособие / Хорошилов Н.В., Пилюгин А.В., Хорошилова Л.В., Бирюлин В.И., Ларин О.М. – 3-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 352 с.
6. Общие методы выбора параметров и оценки эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока [Текст] / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). – Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 15 – 17 сентября 2015 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава. – Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 27 – 30 октября 2015 г., Комитет ОСЖД, г.Варшава – 30 октября 2015 г. – 13 с.
7. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К Г Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982 – 527 с.
8. Марквардт, К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Том.1. [Текст]:/ Под ред. Марквардт К.Г. – М. : Транспорт, 1980 – 256 с.

9. Герасименко, А. А, Федин, В.Т. Передача и распределение электрической энергии [Текст] : учеб. пособие. / Герасименко А.А, Федин В.Т. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. - 720 с, ил.
10. Центр комплектации «СпецТехноРесурс» [Электронный ресурс]. г.Москва. – Режим доступа: <http://laborant.ru/eltech/03/3/0/14-98.htm>
11. Герман-Галкин, С.Г., Кардонов, Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК [Текст]: учебное пособие / Герман - Галкин С.Г., Кардонов Г.А. – СПб: КОРОНА принт, 2003 – 256с., ил.
12. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст]: учебное пособие / Герман - Галкин С.Г – СПб: КОРОНА принт, 2001 – 320с., ил.
13. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учебник / Л.А. Бессонов. – 12-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2010. – 637 с., ил.
14. Якимов, Г.Б. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий [Текст]: справочник / под ред. Якимова Г.Б. – М.: «ТРАНСИЗДАТ», 2001 – 512 с.
15. Шапиро, И.М., Рокотян, С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / В. В. Ершевич, А. Н. Зейлигер, Г. А. Илларионов и др.: Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1985. – 352 с., ил.
16. Электрические схемы электровоза 2ЭС5К «ЕРМАК» / ВСЖД. – Улан-Удэ. – 47 с.
17. Кочетков, В.П. Основы электропривода [Текст]: учебное пособие / Кочетков В.П. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб.федер. ун-т; ХТИ – филиал СФУ, 2007 – 260 с., ил.
18. Кочетков, В.П. Основы электромеханики [Текст]: учебное пособие / В.П. Кочетков, В.Я. Беспалов, Е.Я. Глушкин ; Сибирский федеральный университет. - Красноярск : СФУ, 2010. – 624 с.

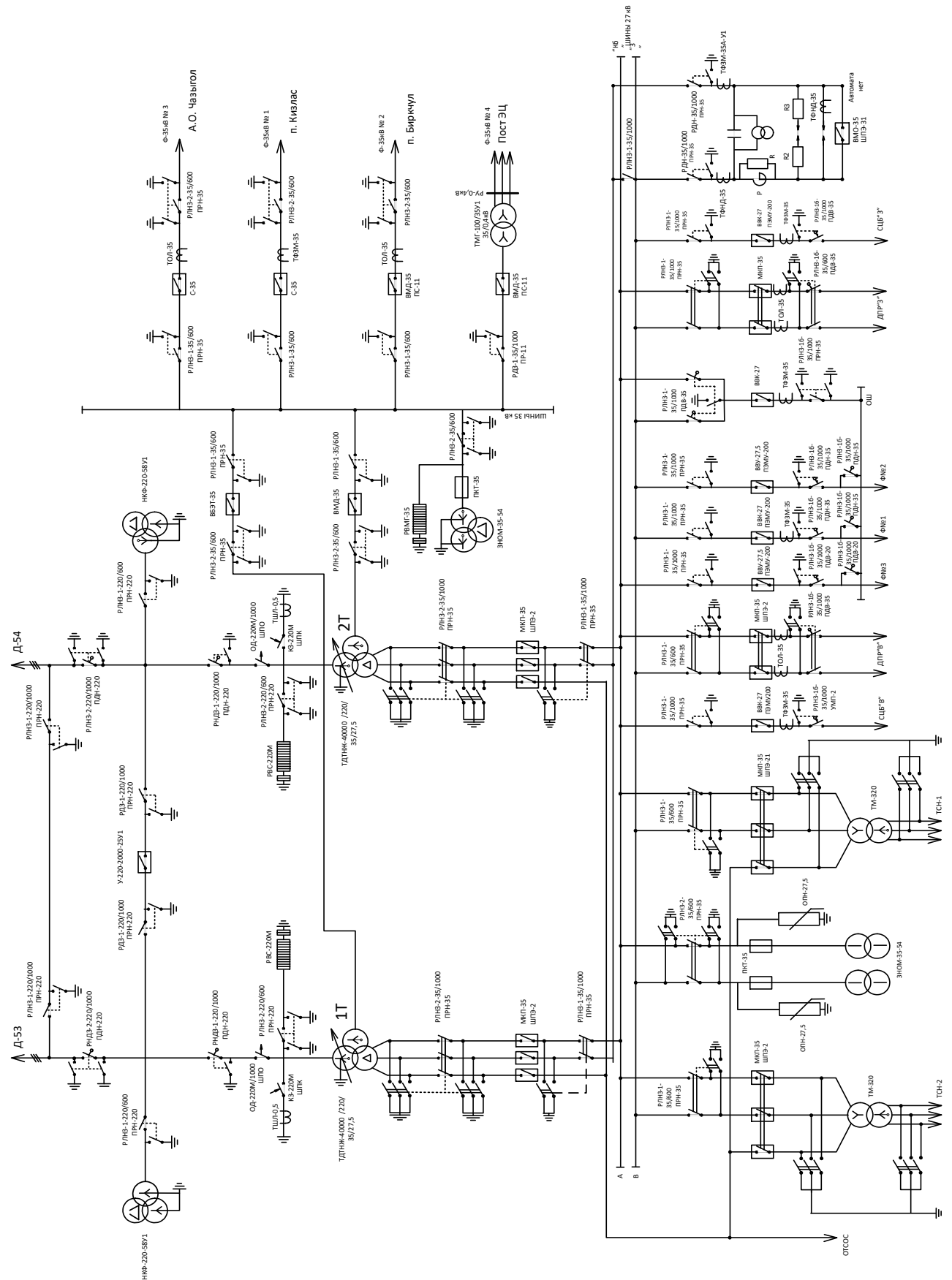


19. Силовые трансформаторы. Каталог силовых трансформаторов с характеристиками и фото [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silovoytransformator.ru/27-5-kv/ondce-435025-ukrelektroapparat.htm>
20. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – введ. 1.07.2014 г. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.
21. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / под ред. М.А. Калугиной. М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
22. Грищенко, А. В. Моделирование влияния электропривода тяги на систему электроснабжения / А. В. Грищенко, А.В. Коловский // Современные проблемы развития фундаментальных и прикладных наук : материалы IV Междунар. научн.-практ. конф., Т. 2. – Прага: Printing house «Maestro», 2016. – С. 42-45.
23. Аррилага, Дж., Брэдли, Д., Боджер, Д. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, Д. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
24. Энергетика. Оборудование. Документация. Статья: «Умные сети и новая эпоха в энергетике» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forca.ru/stati/energetika/umnye-seti-i-novaya-epoha-v-energetike.html>
25. Ледин, С.С. Интеллектуальные сети SMART GRID – будущее российской энергетики [текст] : статья / С.С. Ледин // Автоматизация & IT в энергетике – №11(16), ноябрь 2010.
26. АО «Нидек АСИ ВЭИ». Качество электроэнергии, компенсация реактивной мощности, высоковольтный частотный электропривод. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nidec-asi-vei.ru/>
27. Завод КПМ. Производство реакторов и трансформаторов. г. Санкт – Петербург. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.complectprom.ru/>

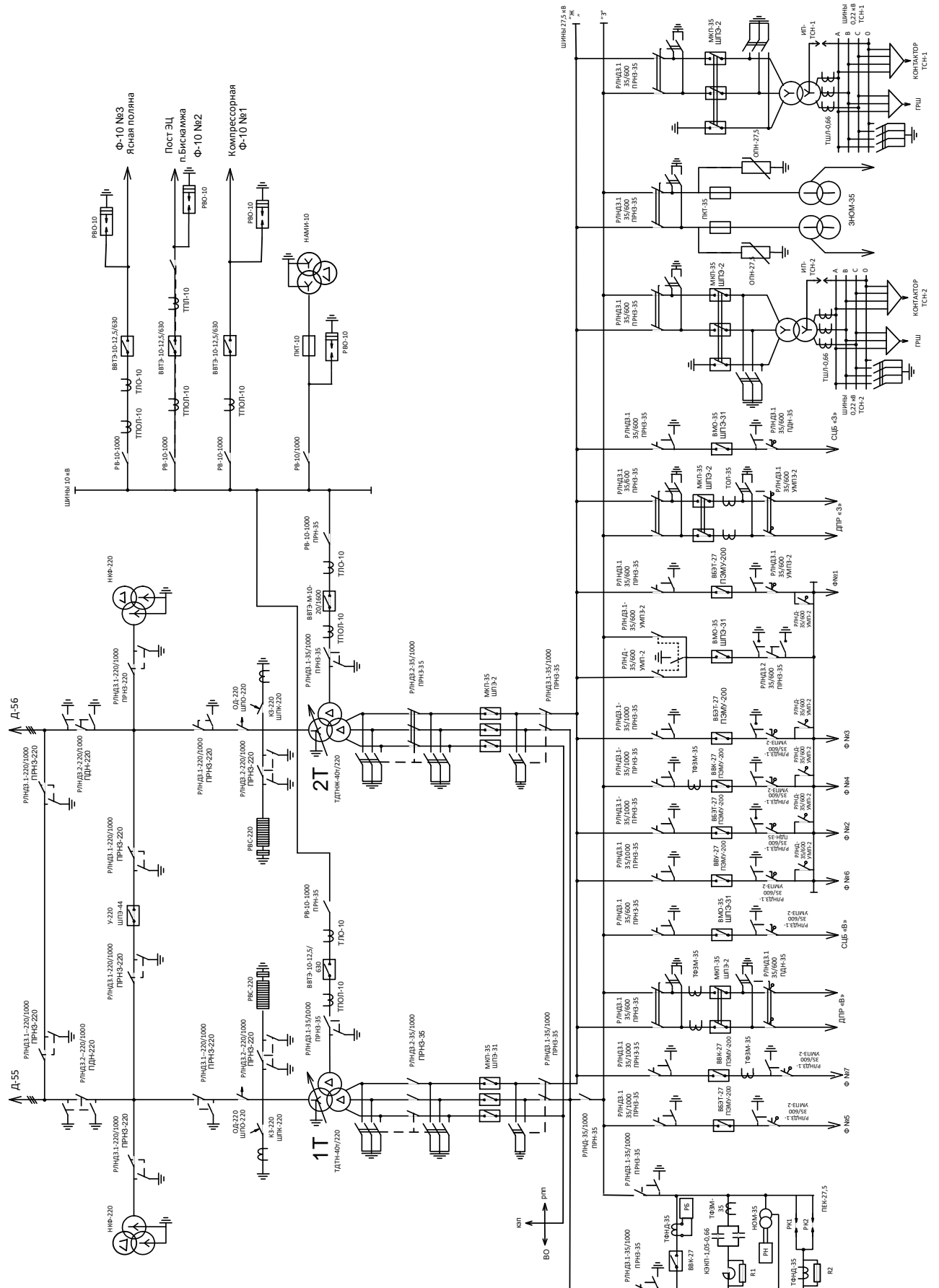
# ПРИЛОЖЕНИЕ А. Однолинейная схема тяговой подстанции Камышта



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Однолинейная схема тяговой подстанции Югачи



# ПРИЛОЖЕНИЕ В. Однолинейная схема тяговой подстанции Бискамжа



## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Алгоритм расчета параметров линий контактной сети, представленный в М-файле системы MATLAB**

```
% Рельсовая цепь
Lks=2;
R0res=0.147;
Rres=R0res*Lks;
X0=0.4;
Xks=X0*Lks;
Q0ks=(27.5e3)^2*2.8e-6*Lks/6; %половина зарядной мощности

% ДПП Бискамжа - Югачи
Rdpr0=0.244;
Ldpr=4.2+6.9+2.5+0.5+10.2+0.5+8.1+0.5+10.3;
X0=0.4;
Xdpr=X0*Ldpr;
Rdpr=Rdpr0*Ldpr;

% Отсасывающая линия фидер от Бискамжи до Ф51
R0ol_1=0.17;
Lol_1=2.7;
X0ol_1=0.4;
Rol_1=R0ol_1*Lol_1;
Xol_1=X0ol_1*Lol_1;

% Отсасывающая линия Фидер от Ф11 до Ст. Югачи
R0ol_3=0.17;
Lol_3=10.3;
X0ol_3=0.4;
Rol_3=R0ol_3*Lol_3;
Xol_3=X0ol_3*Lol_3;

% Отсасывающая линия фидер от Бискамжи до Ф62
R0ol_2=0.17;
Lol_2=2.7;
X0ol_2=0.4;
Rol_2=R0ol_2*Lol_2;
Xol_2=X0ol_2*Lol_2;

% Отсасывающая линия Фидер от Ф21 до Ст. Югачи
R0ol_4=0.17;
Lol_4=3.1;
X0ol_4=0.4;
Rol_4=R0ol_4*Lol_4;
Xol_4=X0ol_4*Lol_4;

% Контактная сеть Бискамжа - Югачи (верх.линия)
R0bf51=0.17;
Lbf51=2.7;
X0=0.4;
Xbf51=X0*Lbf51;
```

$Rbf51 = R0bf51 * Lbf51$ ; %фидер от Бискамжи до Ф51

$R0f51A\_1 = 0.48$ ;

$R0f51A\_2 = 0.185$ ;

$R0f51A\_3 = 0.17$ ;

$Lf51A = 4.2$ ;

$X0 = 0.4$ ;

$Xf51A = X0 * Lf51A$ ;

$Rf51A\_1 = R0f51A\_1 * Lf51A$ ;

$Rf51A\_2 = R0f51A\_2 * Lf51A$ ;

$Rf51A\_3 = R0f51A\_3 * Lf51A$ ; %От Ф51 –до воздушного промежутка А

$R0AI1\_1 = 0.48$ ;

$R0AI1\_2 = 0.185$ ;

$R0AI1\_3 = 0.17$ ;

$LAI1 = 6.9$ ;

$X0 = 0.4$ ;

$XAI1 = X0 * LAI1$ ;

$RAI1\_1 = R0AI1\_1 * LAI1$ ;

$RAI1\_2 = R0AI1\_2 * LAI1$ ;

$RAI1\_3 = R0AI1\_3 * LAI1$ ; %От воздушного промежутка А - до воздушного промежутка И-1

$R0nt\_11 = 0.48$ ;

$R0nt\_21 = 0.185/2$ ;

$Lnt\_11 = 2.41$ ;

$X0 = 0.4$ ;

$Xnt\_11 = X0 * Lnt\_11$ ;

$Rnt\_11 = R0nt\_11 * Lnt\_11$ ;

$Rnt\_21 = R0nt\_21 * Lnt\_11$ ; %нанхчульский тоннель

$R0nch\_11 = 0.48$ ;

$R0nch\_21 = 0.185$ ;

$Lnch\_11 = 0.5$ ;

$X0 = 0.4$ ;

$Xnch\_11 = X0 * Lnch\_11$ ;

$Rnch\_11 = R0nch\_11 * Lnch\_11$ ;

$Rnch\_21 = R0nch\_21 * Lnch\_11$ ; %станция нанхчул

$R0BA\_1 = 0.158$ ;

$R0BA\_2 = 0.185$ ;

$R0BA\_3 = 0.17$ ;

$LBA = 10.2$ ;

$X0 = 0.4$ ;

$XBA = X0 * LBA$ ;

$RBA\_1 = R0BA\_1 * LBA$ ;

$RBA\_2 = R0BA\_2 * LBA$ ;

$RBA\_3 = R0BA\_3 * LBA$ ; %От воздушного промежутка В - до воздушного промежутка А  
(нанчхул - хабзас)

$R0xz\_11 = 0.158$ ;

$R0xz\_21 = 0.185$ ;

$Lxz\_11 = 0.5$ ;

$X0=0.4;$   
 $X_{xz\_11}=X0*L_{xz\_11};$   
 $R_{xz\_11}=R0_{xz\_11}*L_{xz\_11};$   
 $R_{xz\_21}=R0_{xz\_21}*L_{xz\_11};$  %станция хазбас

$R0BA2\_1=0.17;$   
 $R0BA2\_2=0.158;$   
 $R0BA2\_3=0.185;$   
 $LBA2=8.1;$   
 $X0=0.4;$   
 $XBA2=X0*LBA2;$   
 $RBA2\_1=R0BA2\_1*LBA2;$   
 $RBA2\_2=R0BA2\_2*LBA2;$   
 $RBA2\_3=R0BA2\_3*LBA2;$  %от хазбаса до биркчуль

$R0br\_11=0.158;$   
 $R0br\_21=0.185;$   
 $Lbr\_11=0.5;$   
 $X0=0.4;$   
 $Xbr\_11=X0*Lbr\_11;$   
 $Rbr\_11=R0br\_11*Lbr\_11;$   
 $Rbr\_21=R0br\_21*Lbr\_11;$  %станция биркчул

$R0f11Y=0.17;$   
 $Lf11Y=10.3;$   
 $X0=0.4;$   
 $Xf11Y=X0*Lf11Y;$   
 $Rf11Y=R0f11Y*Lf11Y;$  %Фидер от Ф11 до Ст. Югачи

% Контактная сеть Бискамжа - Югачи (нижняя.линия)

$R0bf62=0.17;$   
 $Lbf62=2.7;$  % длина указана 1.3 км, но по схеме видно, что длина такая же, как и верхняя линия - оставил пока так  
 $X0=0.4;$   
 $Xbf62=X0*Lbf62;$   
 $Rbf62=R0bf62*Lbf62;$  %фидер от Бискамжи до Ф62

$R0f62H2\_1=0.158;$   
 $R0f62H2\_2=0.185;$   
 $R0f62H2\_3=0.17;$   
 $Lf62H2=7;$   
 $X0=0.4;$   
 $Xf62H2=X0*Lf62H2;$   
 $Rf62H2\_1=R0f62H2\_1*Lf62H2;$   
 $Rf62H2\_2=R0f62H2\_2*Lf62H2;$   
 $Rf62H2\_3=R0f62H2\_3*Lf62H2;$  %От Ф62 – до вставки H2

$R0H2H4\_1=0.158;$   
 $R0H2H4\_2=0.185;$   
 $LH2H4=0.3;$   
 $X0=0.4;$

$XH2H4 = X0 * LH2H4;$   
 $RH2H4\_1 = R0H2H4\_1 * LH2H4;$   
 $RH2H4\_2 = R0H2H4\_2 * LH2H4;$  %От вставки H2 до H4

$R0H4I2\_1 = 0.622;$   
 $R0H4I2\_2 = 0.185;$   
 $R0H4I2\_3 = 0.17;$   
 $LH4I2 = 6.9;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $XH4I2 = X0 * LH4I2;$   
 $RH4I2\_1 = R0H4I2\_1 * LH4I2;$   
 $RH4I2\_2 = R0H4I2\_2 * LH4I2;$   
 $RH4I2\_3 = R0H4I2\_3 * LH4I2;$  %От вставки H4 до И2

$R0nt\_12 = 0.48;$   
 $R0nt\_22 = 0.185/2;$   
 $Lnt\_22 = 2.41;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $Xnt\_12 = X0 * Lnt\_22;$   
 $Rnt\_12 = R0nt\_12 * Lnt\_22;$   
 $Rnt\_22 = R0nt\_22 * Lnt\_22;$  %нанхчульский тоннель

$R0nch\_12 = 0.48;$   
 $R0nch\_22 = 0.185;$   
 $Lnch\_22 = 0.5;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $Xnch\_12 = X0 * Lnch\_22;$   
 $Rnch\_12 = R0nch\_12 * Lnch\_22;$   
 $Rnch\_22 = R0nch\_22 * Lnch\_22;$  %станция нанхчул

$R0gb\_1 = 0.622;$   
 $R0gb\_2 = 0.185;$   
 $Lgb = 10.2;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $Xgb = X0 * Lgb;$   
 $Rgb\_1 = R0gb\_1 * Lgb;$   
 $Rgb\_2 = R0gb\_2 * Lgb;$  %От вставки Г до Б (нанчхул - хабзас)

$R0xz\_12 = 0.622;$   
 $R0xz\_22 = 0.185;$   
 $Lxz\_22 = 0.5;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $Xxz\_12 = X0 * Lxz\_22;$   
 $Rxz\_12 = R0xz\_12 * Lxz\_22;$   
 $Rxz\_22 = R0xz\_22 * Lxz\_22;$  %станция хазбас

$R0gb2\_1 = 0.622;$   
 $R0gb2\_2 = 0.185;$   
 $R0gb2\_3 = 0.17;$   
 $Lgb2 = 8.1;$   
 $X0 = 0.4;$   
 $Xgb2 = X0 * Lgb2;$



$R_{gb2\_1} = R_{0gb2\_1} * L_{gb2}$ ;  
 $R_{gb2\_2} = R_{0gb2\_2} * L_{gb2}$ ;  
 $R_{gb2\_3} = R_{0gb2\_3} * L_{gb2}$ ; %от хазбаса до биркчуль

$R_{0br\_12} = 0.622$ ;  
 $R_{0br\_22} = 0.185$ ;  
 $L_{br\_22} = 0.5$ ;  
 $X_0 = 0.4$ ;  
 $X_{br\_12} = X_0 * L_{br\_22}$ ;  
 $R_{br\_12} = R_{0br\_12} * L_{br\_22}$ ;  
 $R_{br\_22} = R_{0br\_22} * L_{br\_22}$ ; %станция биркчул

$R_{0BA3\_1} = 0.622$ ;  
 $R_{0BA3\_2} = 0.185$ ;  
 $R_{0BA3\_3} = 0.17$ ;  
 $L_{BA3} = 7$ ;  
 $X_0 = 0.4$ ;  
 $X_{BA3} = X_0 * L_{BA3}$ ;  
 $R_{BA3\_1} = R_{0BA3\_1} * L_{BA3}$ ;  
 $R_{BA3\_2} = R_{0BA3\_2} * L_{BA3}$ ;  
 $R_{BA3\_3} = R_{0BA3\_3} * L_{BA3}$ ; %от вставки В до А (биркчул - югачи)

$R_{0f21Y} = 0.17$ ;  
 $L_{f21Y} = 3.1$ ;  
 $X_0 = 0.4$ ;  
 $X_{f21Y} = X_0 * L_{f21Y}$ ;  
 $R_{f21Y} = R_{0f21Y} * L_{f21Y}$ ; %Фидер от Ф21 до Ст. Югачи

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Алгоритм расчета параметров электровоза ЕРМАК, представленный в М-файле системы MATLAB

```
% параметры двигателя
P=780*2;
U=980;
ia=843*2;
n=925;
Rgp=0.00706;
Rdp=0.0132;
Rad=0.0112;
Ra=(Rgp+Rdp+Rad)/2;
La=0.03*Ra;
w=2*pi*n/60;
Mn=P/w*1000;
U1=1260;
DU=U1-945;
U2=U1-DU;
U3=U2-DU;
Laf=Mn/ia^2;
Rv=(U-ia*Mn/ia^2*w)/ia-Ra;
Lv=0.6*Rv;
alfad=30;
alfar=30;
edr=U2*0.9*cos(alfar*pi/180)+ia*Ra;
ed=U1*0.9*cos(alfad*pi/180)-ia*(Ra+Rv);

mel=30e3;
mc=75e3;
ir=88/21;
r=0.6;
J=1000;

v=50/3.6; %скорость состава
w0=v*ir/r; %установившаяся скорость двигателя
% Угол наклона
nak=3*pi/180;
Pmex=(mel+mc)*9.8*v*(sin(abs(nak))+sign(nak)*0.1*sqrt(1-sin(nak^2)));
yгол=sin(abs(nak))+sign(nak)*0.1*sqrt(1-sin(nak^2));
Mmex=Pmex/w0/4;
```